

Акустика аудиторий

Флойд Роу Уотсон

UNIVERSITY OF ILLINOIS BULLETIN

ISSUED WEEKLY

Vol. XI

MARCH 16, 1914

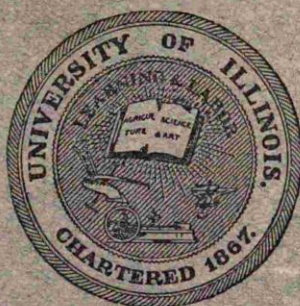
No. 29

Entered as second-class matter Dec. 11, 1912, at the Post Office at Urbana, Ill., under the Act of Aug. 24, 1912.

ACOUSTICS OF AUDITORIUMS

BY

F. R. WATSON



BULLETIN No. 73

ENGINEERING EXPERIMENT STATION

PUBLISHED BY THE UNIVERSITY OF ILLINOIS, URBANA

PRICE: TWENTY CENTS

EUROPEAN AGENT

CHAPMAN AND HALL, LTD., LONDON

Электронная книга проекта "Гутенберг" по акустике аудиторий

Эта электронная книга предназначена для использования любым человеком в любой точке Соединенных Штатов и большинства других частей мира бесплатно и практически без каких-либо ограничений. Вы можете скопировать его, раздать или повторно использовать в соответствии с условиями лицензии Project Gutenberg, прилагаемой к этой электронной книге, или онлайн по адресу www.gutenberg.org. Если вы находитесь за пределами Соединенных Штатов, вам необходимо ознакомиться с законами страны, в которой вы находитесь, прежде чем использовать эту электронную книгу.

Название: Акустика аудиторий

Автор: Флойд Роу Уотсон

Дата выхода: 10 февраля 2023 [Электронная книга №70013]

Язык: Английский

Оригинальная публикация: США: Университет Иллинойса, 1914 г.

Кредиты: Чарли Ховард и команда онлайн-корректоров по адресу <https://www.pgdp.net> (Этот файл создан на основе изображений, щедро предоставленных интернет-архивом)

*** НАЧАЛО ПРОЕКТА ЭЛЕКТРОННОЙ КНИГИ ГУТЕНБЕРГА "АКУСТИКА АУДИТОРИЙ" ***

Примечание переписчика

Увеличенные версии большинства иллюстраций можно просмотреть, щелкнув по ним правой кнопкой мыши и выбрав опцию для просмотра их отдельно или дважды нажав и / или растянув их.

ВЕСТНИК ИЛЛИНОЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выходит Еженедельно

Том XI. 16 МАРТА 1914 г., № 29

Внесено как дело второго сорта 11 декабря 1912 года в почтовое отделение в Урбане, штат Иллинойс, в соответствии с Законом от 24 августа 1912 года.

АКУСТИКА АУДИТОРИЙ

Ф. Р. УОТСОН



БЮЛЛЕТЕНЬ № 73
ИНЖЕНЕРНО - ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ

Опубликовано Иллинойским университетом в Урбане

Цена: Двадцать центов

Европейский агент
Chapman and Hall, Ltd., Лондон

Инженерная экспериментальная станция была создана актом Попечительского совета от 8 декабря 1903 года. Целью станции является проведение исследований в различных областях техники и изучение проблем, имеющих важное значение для профессиональных инженеров и для производственных, железнодорожных, горнодобывающих, строительных и промышленных интересов государства.

Управление Инженерной экспериментальной станцией возложено на руководителей нескольких кафедр инженерного колледжа. Они составляют Персонал Станции и вместе с Директором определяют характер проводимых исследований. Работа ведется под наблюдением персонала, иногда научными сотрудниками в качестве аспирантов, иногда

членами преподавательского состава инженерного колледжа, но чаще исследователями, принадлежащими к корпусу Станции.

Результаты этих исследований публикуются в виде бюллетеней, в которых фиксируются в основном эксперименты собственного штата исследователей Станции. Также время от времени будут выпускаться циркуляры, сборники с результатами экспериментов инженеров, промышленных предприятий, технических учреждений и государственных испытательных отделов.

Том и номер в верхней части титульного листа обложки являются просто произвольными номерами и относятся к общим публикациям Иллинойского университета; *либо над названием, либо под печатью указан номер бюллетеня или циркуляра Инженерной экспериментальной станции, который следует использовать при указании на эти публикации.*

За копиями бюллетеней, циркуляров или другой информацией обращайтесь на Инженерную экспериментальную станцию, Урбана, Иллинойс.



Рис. 1. Аудитория Иллинойского университета.

АКУСТИКА АУДИТОРИЙ Исследование акустических свойств аудитории в Университете Иллинойса.

I. Введение.

В последние годы в умах архитекторов возникло большое беспокойство из-за плохой акустики, которая существует во многих аудиториях. Преобладание эха и реверберации с вытекающими отсюда трудностями слуха и понимания со стороны аудитора противоречит назначению аудитории и снижает ее ценность.

Аудитория в Университете Иллинойса представляет собой такой случай. Здание имеет форму, близкую к полусфере, с несколькими большими арками и углублениями, нарушающими правильность его внутренней поверхности. Первоначальные планы архитектора были свернуты из-за нехватки денег, выделенных на строительство. Таким образом, интерьер зала был построен абсолютно просто, почти без нарушения больших гладких поверхностей стен; и поначалу здесь не было никакой мебели, кроме сидений и ковриков цвета какао в проходах. Акустические свойства оказались очень неудовлетворительными. Существовала реверберация или чрезмерное удлинение звука, и, кроме того, из-за большого размера помещения, формы и расположения стен было создано эхо.

Если наблюдатель стоял на платформе и хлопал в ладоши, получался настоящий звуковой хаос. Эхо доносилось со всех сторон, и раскаты продолжались еще несколько секунд, прежде чем все снова стихло. Ораторы обнаружили, что их высказывания были отвергнуты, а аудиторы по всему залу испытали трудности с пониманием того, что было сказано. Однажды университетский оркестр сыграл пьесу, в которой было соло на ксилофоне под аккомпанемент других инструментов. Случилось так, что лидер слышал эхо сильнее, чем прямой звук, и отбивал им такт. Музыканты, стоявшие рядом с ксилофоном, отбивали такт прямому звуку, в то время как те, что были дальше, следовали за эхом. Путаницу легко себе представить.

Таким образом, казалось, что Зрительный зал обречен быть акустическим ужасом; что ораторы и певцы будут избегать его, а аудиторы будут посещать представления в нем только в знак протеста. Но очевидная неудача была в некотором смысле выгодой, поскольку она предоставила возможность изучить дефектную акустику в исключительно хороших условиях и привела к выводам, которые не только позволили улучшить аудиторию, но и указали на некоторые подводные камни, которых следует избегать при будущем строительстве других залов.

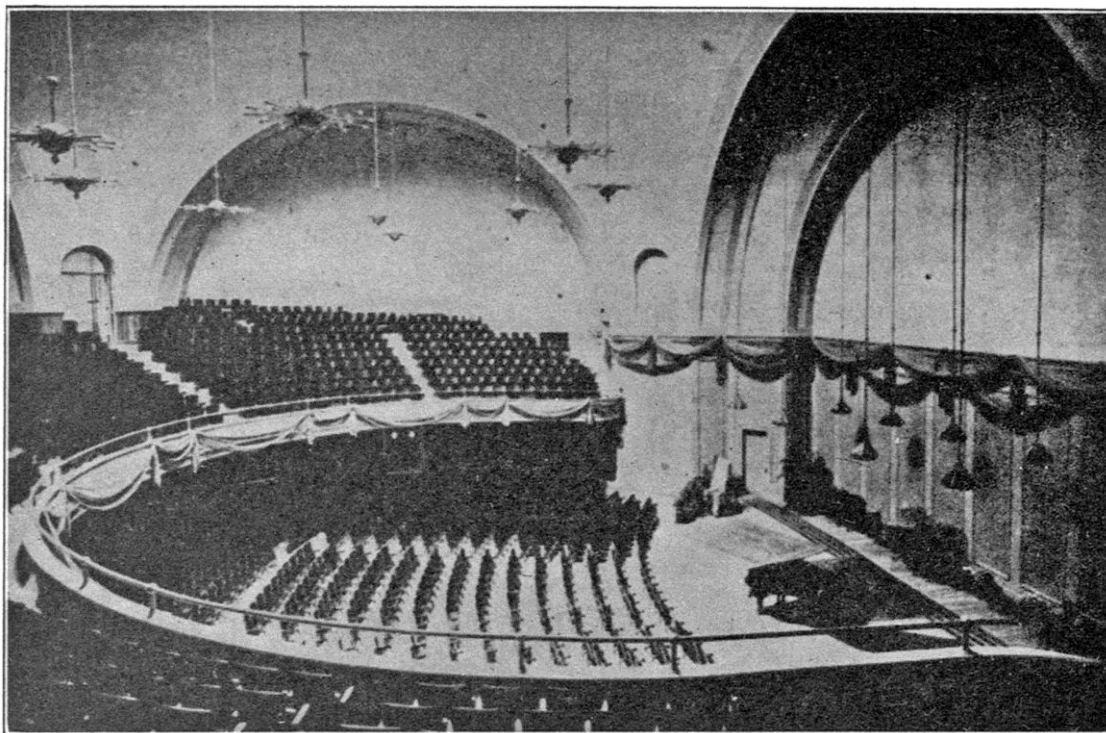


Рис. 2. Фотография интерьера. Вид сцены.

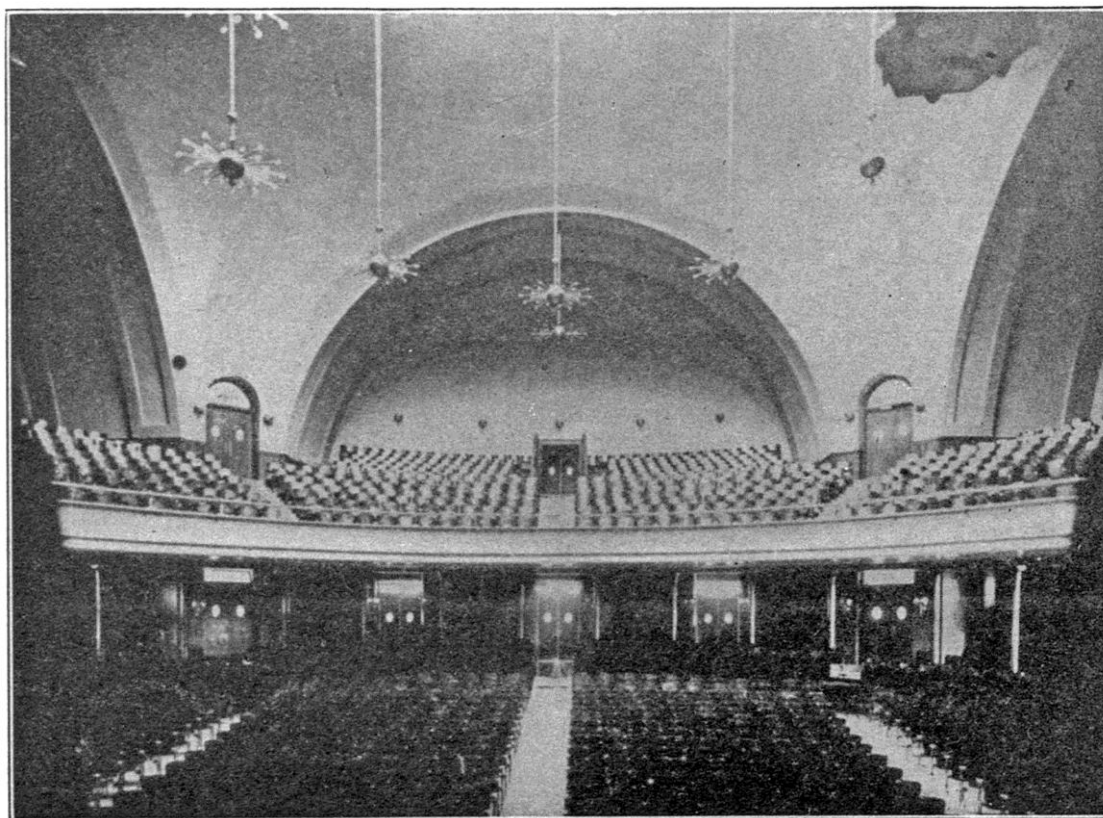


Рис. 3. Фотография интерьера. Вид на балкон.

Исследование акустических свойств зрительного зала было начато в 1908 году и продолжалось в течение шести лет. С самого начала было решено не использовать методы лечения “режь и пробуй”, а заняться проблемой систематически, чтобы, по возможности, можно было найти общие принципы, которые были бы применимы не только к расследуемому случаю, но и к аудиториям в целом. Этот план процедуры задержал решение проблемы, поскольку возникла необходимость изучать теорию звука и проводить лабораторные исследования одновременно с рассмотрением сложных условий в Зрительном зале. Автор провел один год из шести за границей, изучая теорию акустики и inspecting различные аудитории.

Основные эхо-сигналы в зрительном зале были обнаружены с помощью нового метода отслеживания пути распространения звука, время реверберации было определено по методу Сабины, и был поставлен общий диагноз акустических дефектов. Портьеры и шторы были установлены в соответствии с результатами исследования, чтобы в конечном итоге улучшить акустические свойства.

Благодарность.—Автор хотел бы выразить свою глубокую признательность за советы и поддержку, данные президентом Э. Дж. Джеймсом, архитектором-куратором Дж. М. Уайтом и профессором А. П. Карманом с физического факультета. Он также желает выразить признательность за материальную помощь, с радостью оказанную работниками Университета, которая в немалой степени способствовала успешному решению проблемы.

II. Поведение звуковых волн в помещении.

Когда оратор обращается к аудитории, звуки, которые он произносит, распространяются все расширяющимися сферическими волнами, пока не достигают границ помещения. Здесь

звук частично отражается, частично передается, а остальное поглощается. Степень отражения, поглощения и передачи зависит от характера стен. Твердая гладкая стена отражает большую часть звука, поэтому передается или поглощается лишь малая часть. В случае пористой или податливой стены поглощение и передача больше, а отражение меньше. После удара о несколько отражающих поверхностей энергия расходуется, и звук затухает.

Отражение звука создает определенные преимущества и недостатки для акустики. Если учесть, что звук распространяется со скоростью около 1100 футов в секунду, то можно увидеть, что комната обычного размера почти сразу наполняется звуком из-за множества отражений. Например, в комнате площадью 40 квадратных футов количество отражений в секунду между противоположными стенами составляет $1100 \div 40$, или примерно 27. На самом деле это число больше, поскольку звук, проникающий в углы, отражается гораздо чаще, чем в середине, где расстояния между стенами больше. В результате звук тщательно смешивается во всех частях комнаты, чтобы обеспечить одинаковую среднюю интенсивность; то есть звук имеет одинаковую среднюю *громкость* для всех слушателей, даже для тех, кто находится в самых отдаленных углах.

Хотя преимущество отражения звука заключается в выполнении условий громкости, в то же время оно создает возможности для настройки некачественной акустики. Например, когда стены комнаты твердые и гладкие, при каждом звуковом воздействии теряется очень мало энергии, и происходит множество отражений, прежде чем звук окончательно затухает. Это медленное затухание звука, или, как его еще называют, *реверберация*, является наиболее распространенным дефектом в аудиториях.

Если оратор говорит в таком зале, аудиторы испытывают трудности с пониманием. Каждый звук, вместо того чтобы быстро затухать, сохраняется в течение некоторого времени, так что последующие слова сливаются со своими предшественниками и создают смесь звуков, которая приводит к путанице. Решение этой проблемы достигается внедрением таких материалов, как ковры, гобелены и т.п., которые действуют как поглотители звука и сокращают время реверберации.

Когда музыка звучит в зале с продолжительной реверберацией, звуки, следующие друг за другом, сливаются и производят тот же эффект, что и на пианино при игре с включенной педалью громкости. Реверберация более выгодна для музыки, чем для речи, поскольку желательно удлинение и смешение музыкальных тонов, но смешивание слов в речи является явным недостатком. При устранении этого дефекта в залах, используемых как для музыки, так и для выступлений, необходимо выбирать средний курс, чтобы реверберация была несколько длинной для выступлений и несколько короткой для музыки, но достаточно удовлетворительной для обоих.

Возвращаясь к рассмотрению отражения звука, обнаруживается, что может возникнуть другой дефект, а именно *эхо-сигнал*. Это тот случай, когда стена на некотором расстоянии отражает звук в положение одитора. Он слышит звук сначала от говорящего, затем позже благодаря отражению от стены. Временной интервал между прямым и отраженным звуком должен быть достаточно большим, чтобы можно было получить два отчетливых впечатления. Это время составляет примерно $1/15$ секунды, но зависит от остроты зрения наблюдателя. Чем дальше находится стена, тем больше временной интервал и тем более выраженным является эхо. Если стена находится не очень далеко, временной интервал слишком короток, чтобы можно было произвести два различных впечатления, и тогда эффект на одитора будет

почти таким же, как если бы его сосед рядом с ним произносил слова дискурса ему на ухо в то же самое время, когда он получает их непосредственно от говорящего. В случае, если отражающая стена изогнута таким образом, чтобы сфокусировать звук, эхо будет гораздо более выраженным. Таким образом, изогнутая стена, где бы она ни находилась в аудитории, всегда представляет угрозу хорошей акустике.

Существуют и другие воздействия звука, которые могут привести к акустическим дефектам. Например, явление *резонанса* может вызвать проблемы. Предположим, что звуковые волны ударяются об упругую стенку, но не слишком жесткую. Если эти волны правильно рассчитаны по времени, они заставляют стену вибрировать точно так же, как звонарь заставляет колокол звонить последовательностью правильно рассчитанных рывков за веревку колокола. Стена комнаты будет вибрировать под действием этого звука, с которым она созвучна, и усилит его. Теперь предположим, что в комнате играет группа. Определенные тона усиливаются, в то время как на другие это не влияет. При этом исходный звук искажается. То же самое происходит и с голосом говорящего. Звуки, которые он издает, сложны, и по мере того, как они достигают стен, усиливаются определенные компоненты и меняется качество звука. Это резонансное явление также может быть вызвано воздухом в комнате. У каждого зала есть определенная высота звука, на которую он реагирует, и чем меньше объем помещения, тем выше высота звука. Большая аудитория отреагировала бы на очень низкую высоту басового барабана. В небольших комнатах и альковах отклик производится на более высокие тона, что можно наблюдать, пропевая различные ноты гаммы до тех пор, пока не будет достигнут резонанс.

Другое воздействие звука вызывает *интерференцию* волн. Таким образом, отраженные волны могут встречаться со встречными и создавать концентрацию звука в определенных местах и недостаток звука в других.

Подводя итог, видно, что звуковыми эффектами, которые могут существовать в помещении, являются *громкость*, *реверберация*, *эхо*, *резонанс* и *интерференция*, и что наиболее распространенными дефектами являются реверберация и эхо. Теперь мы переходим к обсуждению методов лечения.

III. Методы улучшения неисправной акустики.

A. РЕВЕРБЕРАЦИЯ И ЕЕ ЛЕЧЕНИЕ.

Каждый, несомненно, замечал, что гулкие отзвуки в пустом доме исчезают, когда дом обставляется мебелью. Таким образом, в зрительном зале реверберация уменьшается, когда шторы, gobelены и тому подобное установлены в достаточном количестве. Причина этого действия обнаруживается, когда мы задаемся вопросом, что в конечном итоге происходит со звуком.

Звук - это форма энергии, а энергия не может быть уничтожена. Когда он окончательно угасает, звук должен быть заменен на какую-либо другую форму энергии. В случае со стенами помещения, например, в предыдущем параграфе было показано, что звук может быть преобразован в механическую энергию при приведении этих стен в состояние вибрации. Опять же, часть звука может выходить через открытые окна и, таким образом, исчезать. Остальной звук, согласно лорду Рэлею, преобразуется трением в тепло. Таким

образом, ¹ высокий звук, такой как шипение, прежде чем он распространится на какое-либо большое расстояние, заглушается трением воздуха. Более низкие звуки, достигая стены, вызывают трение в процессе отражения между частицами воздуха и стеной, так что часть энергии преобразуется в тепло. ² Количество теряемой таким образом звуковой энергии невелико, если стены твердые и гладкие. Однако дело обстоит совсем иначе, если стенки шероховатые и пористые, поскольку создается впечатление, что трение в порах превращает звуковую энергию в тепло. В связи с этим Лэмб ³ пишет: “В достаточно узкой трубе волны быстро гасятся, при этом теряемая механическая энергия, конечно, преобразуется в тепло.

* * * * Когда звуковая волна ударяется о плиту, которая пронизана большим количеством мельчайших каналов, часть энергии теряется, что касается звука, за счет рассеивания в этих каналах только что объясненным способом. Щели в драпировках и коврах действуют аналогичным образом, и именно этой причине следует приписать эффект таких приборов по приглушению эха в комнате, поскольку при каждом отражении теряется определенная доля энергии. Следует отметить, что только благодаря действию истинных диссипативных сил, таких как вязкость и теплопроводность, звук может затихнуть в замкнутом пространстве, и никакие простые модификации волн неровностями не принесут никакой пользы”.

В этой связи следует отметить, что любое механическое разрушение звука в результате рельефных работ на стенах или препятствий в помещении в первую очередь не уменьшит энергию звука. Они могут нарушать регулярное отражение и устранять эхо-сигналы, но звуковая энергия как таковая исчезает только при наличии трения.

Следующая цитата из Рэлея ⁴ подчеркивает эти выводы: “В больших пространствах, ограниченных непористыми стенами, крышей и полом, и с небольшим количеством окон, длительный резонанс кажется неизбежным. Смягчающее влияние толстых ковровых покрытий в таких случаях хорошо известно. Применение аналогичного материала для стен и крыши, по-видимому, дает наилучшие шансы на дальнейшее улучшение”.

Экспериментальная работа по лечению реверберации. Наиболее важная экспериментальная работа по применению этого принципа поглощающей способности ковров, штор и т.д. была проделана профессором Уоллесом К. Сэбином из Гарвардского университета. ⁵ В серии интересных экспериментов, длившихся в течение четырех лет, он смог вывести общую зависимость между t , временем реверберации, V , объемом помещения и a , поглощающей способностью различных присутствующих материалов. Таким образом:

$$t = 0,164 V \div a \quad (1)$$

Для хороших акустических условий, то есть для короткого времени реверберации, громкость V должна быть небольшой, а поглощающие материалы, представленные a , большими. Так обстоит дело в маленькой комнате с большим количеством штор, ковров и мебели. Однако, если объем помещения велик, как в случае с аудиторией, а количество поглощающих материалов невелико, это приведет к неприятной реверберации.

Профессор Сабин определил поглощающую способность ряда различных материалов. Если считать открытое окно идеальным поглотителем звука, полученные результаты можно записать примерно следующим образом:

Один квадратный метр открытого оконного пространства	1.000
Один квадратный метр стекла, штукатурки или кирпича	.025
Один квадратный метр плотных ковров, штор и т.д.	.25
Один квадратный метр войлока толщиной 1 дюйм	.75

Эти значения вместе с формулой позволяют произвести расчет времени реверберации до начала строительства. Эта новаторская работа очистила тему архитектурной акустики от нависшего над ней тумана таинственности и позволила увидеть основные принципы в свете научного эксперимента.

В более позднем исследовании⁶ Сабина показала, что реверберация зависит также от высоты звука. В качестве конкретного примера, высокие ноты скрипки могут быть менее резонирующими для большой аудитории, чем более низкие тона басовой виолы, хотя и те, и другие могут иметь одинаковую реверберацию в помещении без зрителей. Опять же, голос мужчины с низкими нотами может дать удовлетворительные результаты в аудитории, в то время как голос женщины с более высокими нотами будет неудовлетворительным.

Эти соображения показывают, что акустика в аудитории зависит не только от объема помещения и количества поглощающего материала, но и от других факторов. Аудитория может быть большой или маленькой, голос оратора высоким или низким, развлекательная программа - музыкальным номером или обращением. В таком случае наилучшее расположение для хорошей акустики - это компромисс, при котором удовлетворяются средние условия. Решение, предложенное профессором Сабиной, является таким средним и оказалось удовлетворительным на практике.

Проблема архитектурной акустики была экспериментально исследована другими специалистами. Стюарт⁷ предложил лекарство от плохих акустических условий в аудитории Сибли Корнеллского университета. Его эксперименты подтвердили работу Сабины. Марадж⁸, исследовав свойства шести залов в Париже, одобрил результаты Сабины и выступил за то, чтобы время реверберации составляло от $\frac{1}{2}$ до 1 секунды для случая речи.

Формулы для реверберации звука в помещении.—С теоретической точки зрения формула Сабины была разработана Франклином,⁹ который получил соотношение $t = 0,1625 V \div a$, интересное подтверждение, поскольку экспериментальное значение константы Сабины составляло 0,164.

Более позднее развитие было дано Егером,¹⁰ который предполагает, что для помещения, размеры которого не превышают примерно 60 футов, звук, заполнив помещение, проходит одинаково во всех направлениях через любую точку и что средняя энергия одинакова в разных частях помещения. Используя теорию вероятности и учитывая, что звуковой луч в любом направлении можно сравнить с частицей с определенной скоростью, он смог вывести формулу Сабины и записать коэффициенты, входящие в константы. Применив свои результаты к случаю отражения звука от стены, он показал, что звук будет отражаться с большей громкостью, когда масса стены будет увеличена и высота звука станет выше. Он также показал, что при столкновении звука с пористой стенкой поглощается больше энергии при высокой высоте звука, чем при низкой, поскольку колебания воздуха более часты и в промежутках материала возникает большее трение.

Б. ЭХО-СИГНАЛЫ И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ.

Отражающая стена создает эхо. Если наблюдатель стоит на некотором расстоянии от передней части скалы и хлопает в ладоши или кричит, он обнаруживает, что звук возвращается к нему со скалы в виде эха. Итак, в аудитории аудитор, находящийся рядом с говорящим, сначала улавливает звук непосредственно от говорящего, затем, мгновение

спустя, сильное повторение звука за счет отражения от дальней стены. Это эхо более выражено, если стена изогнута и аудитор находится в точке, на которой сфокусирован звук.

Чтобы устранить такое эхо, можно рассмотреть два метода. Один из методов заключается в изменении формы стены таким образом, чтобы отраженный звук больше не создавал эхо. То есть либо измените угол наклона стены, чтобы отраженный звук направлялся в новом направлении, где он может быть поглощен или где он может усилить прямой звук, не создавая никакого эха, либо измените поверхность стены с помощью рельефных работ или панелей из поглощающего материала, чтобы сильная отраженная волна была разбита и звук рассеялся. Второй метод заключается в том, чтобы сделать отражающую стенку “идеальным” поглотителем, чтобы падающий звук поглощался и практически не отражался. Эти методы были обозначены как “хирургические” и “лекарственные” соответственно. У каждого метода есть свои недостатки. Изменение формы стен в аудитории, вероятно, приведет к нарушению архитектурного дизайна. С другой стороны, идеальных амортизаторов не существует, за исключением открытых окон, но их редко можно применять. Таким образом, лечение в каждом конкретном случае зависит от изучения особых условий аудитории. Обычно применяется комбинация хирургического и медикаментозного лечения. Например, было обнаружено, что кессонирование стены с возможностью установки панелей из поглощающего материала хорошо помогает улучшить акустику, а также во многих случаях вписывается в архитектурные особенности.

ПОПУЛЯРНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЛЕЧЕНИЯ.—ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОВОДОВ И ЗВУКОВЫХ ПАНЕЛЕЙ.

Следует сказать несколько слов о распространенном представлении о том, что провода и звуковые платы эффективны при лечении неисправной акустики. Эксперименты и наблюдения показывают, что от проводов практически нет пользы, а деки можно использовать только в особых случаях. Провода, натянутые в помещении, практически не влияют на звук, поскольку они образуют слишком малую поверхность, чтобы нарушать колебания волн. Они оказывают на звуковые волны почти такое же воздействие, какое леска, брошенная в воду, оказывает на волны на воде. Идея, возможно, приобрела известность благодаря действию пианино, реагирующего на ноты певца. Пианино имеет все преимущества перед струнами в зрительном зале. В нем большое количество струн, настроенных на разную высоту звука, так что он откликается на любую спетую ноту. У него также есть дека, которая сильно усиливает звучание струн. Наконец, певец обычно находится рядом с пианино. Провод в зале реагирует только на один тон из многих, которые, вероятно, будут присутствовать, у него нет деки, и певец находится на некотором расстоянии. Но, таким образом, следует ожидать незначительного эффекта.

Автор посетил ряд залов, где были установлены провода, и пока не нашел случая, когда это привело к заметному улучшению.¹¹ Сабина¹² приводит случай, когда в зале было протянуто пять миль проволоки, что никак не повлияло на акустические условия. Любопытно, что столь ошибочная концепция выросла в общественном сознании при столь незначительной экспериментальной базе, подтверждающей ее.

Деки.—Деки или, правильнее сказать, отражающие панели имеют ценность в особых случаях. Ниже описаны некоторые эксперименты, в которых были получены выраженные эффекты. Дека должна иметь специальную конструкцию, соответствующую условиям, в которых она будет использоваться.

Моделирование новых аудиторий вместо старых с хорошей акустикой.— Еще одно часто высказываемое предложение заключается в том, чтобы архитекторы моделировали аудитории по образцу уже построенных, обладающих хорошими акустическими свойствами. Из этого не следует, что залы, смоделированные таким образом, будут успешными, поскольку материалы, используемые при строительстве, из года в год не меняются. Например, несколько лет назад было обычным делом наносить известковую штукатурку на деревянную рейку; сейчас часто практикуется наносить гипсовую штукатурку на металлическую рейку, которая образует совершенно другой вид поверхности. Это последнее устройство создает твердые, непористые стены, которые поглощают лишь небольшое количество звука и, таким образом, усиливают реверберацию. Кроме того, новый зал обычно несколько отличается по форме от старого, в соответствии с идеями архитектора, и очень вероятно, что изменения повлияют на акустику.

D. ВЛИЯНИЕ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА АКУСТИКУ.

На первый взгляд может показаться, что система вентиляции в помещении влияет на акустические свойства. Воздух - это среда, которая передает звук. Было показано, что ветер оказывает влияние на изменение направления распространения звука.¹³ Звук также отражается и преломляется на границе раздела газов, которые различаются по плотности и температуре.¹⁴ Однако обнаружено, что влияние обычных вентиляционных потоков на акустику в аудитории невелико. Разница температур между нагретым током и воздухом в помещении недостаточно велика, чтобы оказать заметное влияние на звук, а движение тока слишком медленное и на слишком коротком расстоянии, чтобы изменить действие звука в какой-либо заметной степени.¹⁵

При особых обстоятельствах системы отопления и вентиляции могут оказаться неэффективными.¹⁶ Горячая плита или поток горячего воздуха в центре помещения могут серьезно нарушить действие звука. Любая неравномерность в воздушных потоках, приводящая к колебаниям слоев холодного и нагретого воздуха по помещению, также изменяет регулярное действие звука и создает путаницу. Цель, к которой следует стремиться, - поддерживать воздух в помещении как можно более однородным и устойчивым. Горячие печи, радиаторы отопления и потоки нагретого воздуха должны располагаться вблизи стен и не в центре помещения. Некоторое небольшое преимущество имеет направление вентиляционного потока в том же направлении, что и звук, поскольку ветер имеет тенденцию уносить звук с собой.

IV. Расследование в аудитории Иллинойского университета.

A. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ РАБОТА.

Как уже говорилось, когда наблюдатель в Зале говорил, кричал или хлопал в ладоши, создавался звуковой хаос. Присутствовало как эхо, так и реверберации, которые были слышны во всех частях зала, хотя эхо, казалось, было самым сильным на сцене и балконе. Перспективы улучшения акустики были не очень обнадеживающими. К счастью, лечение реверберации было довольно простым, поскольку метод Сабины давал определенную процедуру, которую можно было применить к этому случаю. Лекарство от эха, однако, еще предстояло найти. Сначала необходимо было выяснить, в каких стенах возник дефект.

Попытка обнаружить эхо-сигналы путем создания звука и прослушивания ухом увенчалась лишь частичным успехом. Ухо достаточно чувствительно, но приходит в замешательство, когда присутствует множество эхо-сигналов, доносящихся, по-видимому, со всех сторон, так что полученные таким образом доказательства не совсем убедительны. Стало очевидно, что успешное решение заключается в фиксации внимания на звуке, идущем в определенном направлении, и выяснении, куда он направляется после размышления; затем прослеживание пути в другом конкретном направлении и так далее, пока полученные доказательства не дадут некоторый намек на общее действие звука.

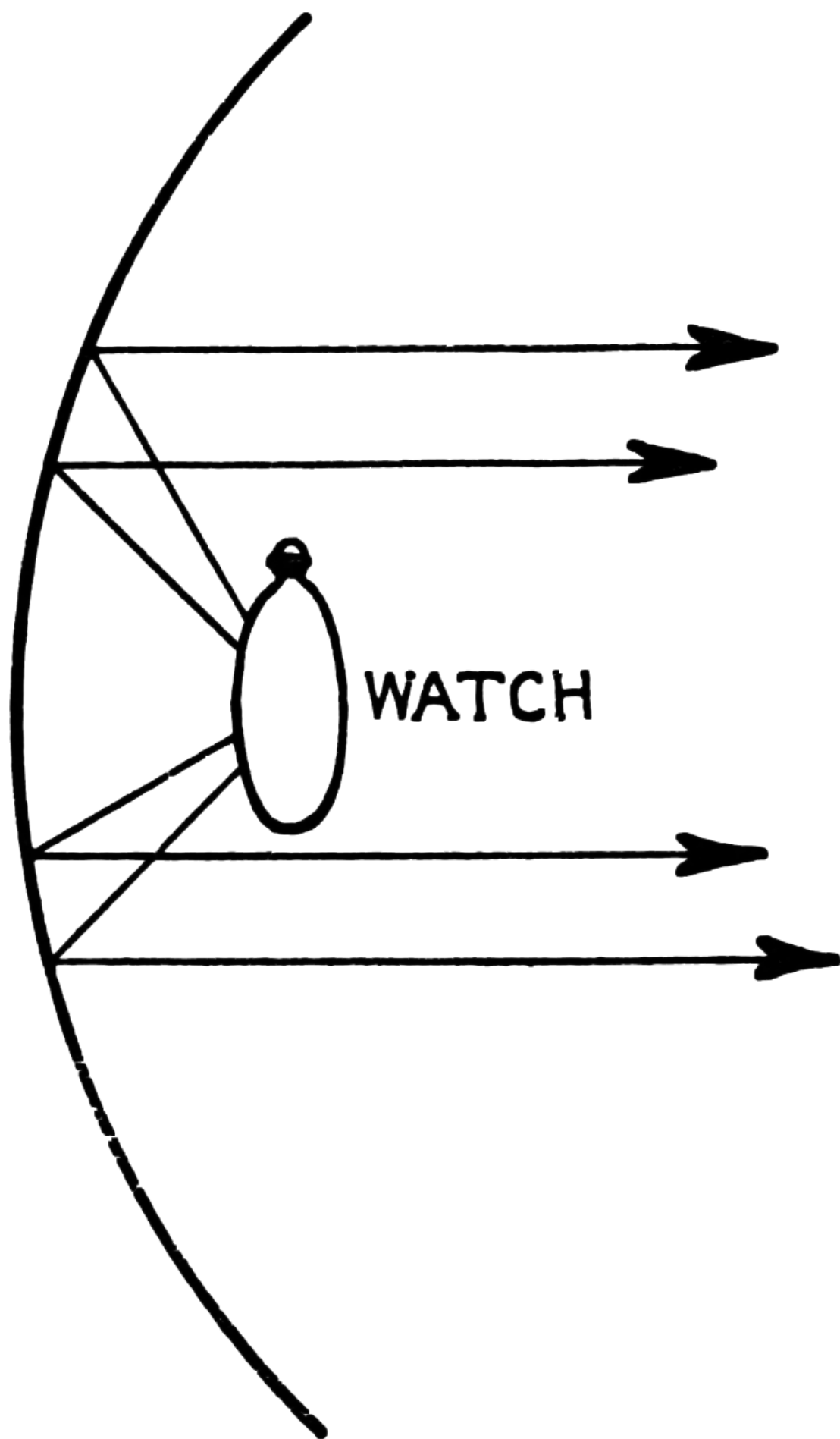


Рис. 4. Часы как источник звука, подкрепленный вогнутым отражателем.

Первым шагом в применении этого принципа было использование слабого звука, который нельзя было услышать на большом расстоянии, если его каким-либо образом не усилить. Тиканье часов было направлено с помощью отражателя (рис. 4) на определенные стены, которые, как предполагалось, издавали эхо. Используя соотношение, согласно которому угол падения равен углу отражения, отраженный звук был легко обнаружен, и тиканье часов было отчетливо слышно после того, как они прошли общее расстояние в 70-80 футов от источника.

В более позднем эксперименте использовался метроном, который издавал более громкий звук. Он был заключен в звуконепроницаемую конструкцию (рис. 5) только с одним отверстием, чтобы звук можно было направлять с помощью рупора. Этот метод был предложен работой Густава Лайона в зале Трокадеро в Париже, [17](#), где использовалось несколько похожее расположение. Метод оказался успешным и подтвердил сделанные ранее наблюдения.

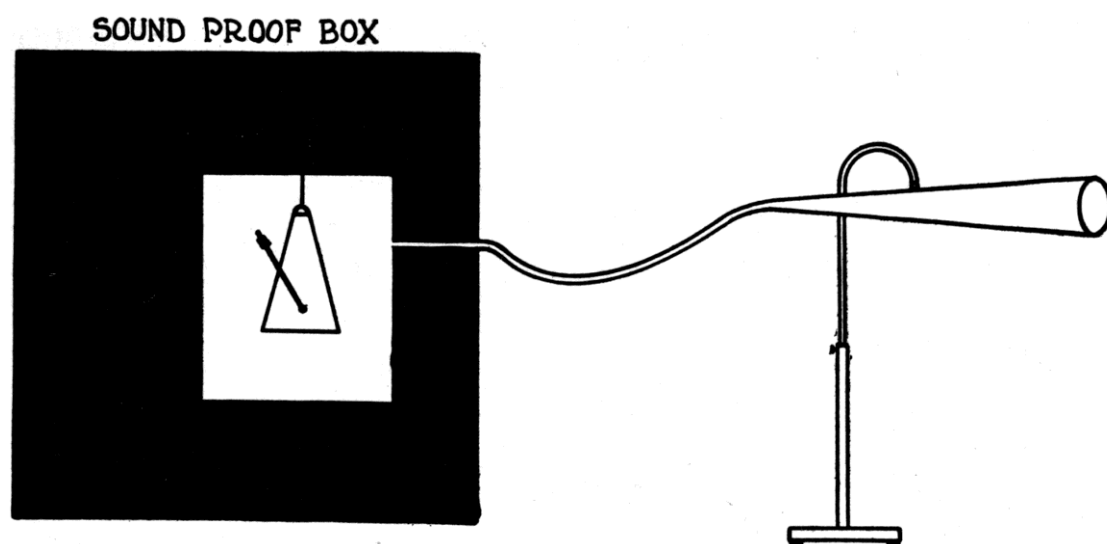


Рис. 5. Метроном как источник звука.

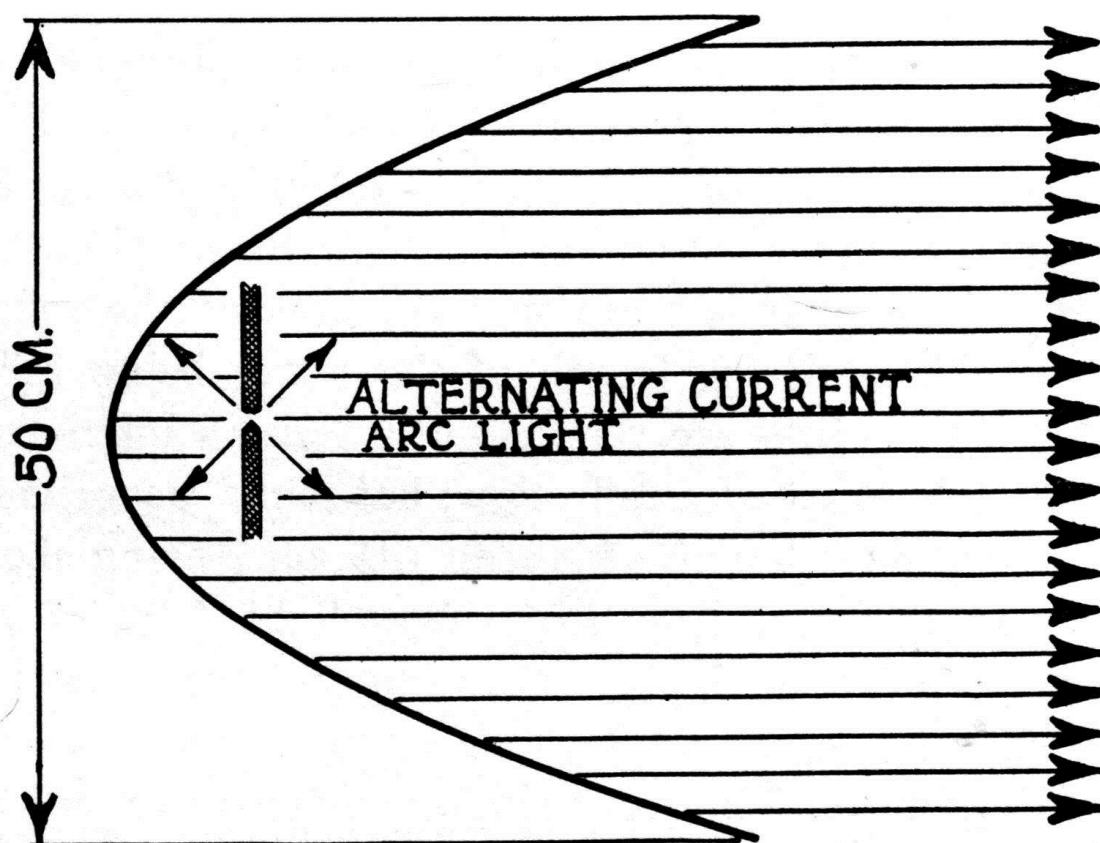


Рис. 6. Дуговая лампа как источник звука.

Хотя результаты, полученные с помощью часов и метронома, казались убедительными, наблюдатель не всегда был уверен в результатах. Был изыскан другой метод, и более удовлетворительный был найден при использовании дуговой лампы переменного тока в фокусе параболического отражателя (рис. 6). В дополнение к свету дуга издавала шипящий звук, который имел коротковолновую длину и, следовательно, испытывал лишь незначительную дифракцию. Таким образом, пучок световых лучей сопровождался пучком звуков, исходящих из одного и того же источника и подчиняющихся одному и тому же закону отражения. Траекторию звука было легко определить, отметив положение светового пятна на стене. Отраженный звук был обнаружен с использованием соотношения, согласно которому углы падения и отражения равны. Звук дуговой лампы был интенсивным и придавал наблюдателю уверенность в результатах, которой не хватало другим методам. Чтобы отслеживать последовательные отражения, к отражающим стенам были прикреплены маленькие зеркала таким образом, чтобы путь отраженного звука был обозначен отраженным светом. Затем с помощью этого метода был поставлен “диагноз” акустических проблем Зрительного зала.

Здесь следует отметить, что звук дуговой лампы - это не то же самое, что звуки музыки или речи, поскольку последние имеют более низкую высоту звука и большую длину волны. Таким образом, вызывало сомнение, будут ли полученные результаты справедливы также в случае речи или музыки. Однако тесты, проведенные наблюдателями, находившимися в Аудитории во время исполнения музыкальных номеров и речей, подтвердили общие выводы, полученные с помощью дуговой лампы.

В этой связи следует отметить, что существуют возражения против применения “лучевого” метода геометрической оптики к случаю звука. Получить звуковой луч гораздо сложнее, чем луч света.¹⁸ Это связано с разницей в длинах волн в двух случаях. Похоже, что волны

дифрагируют, или распространяются, пропорционально их длине, причем более длинные волны распространяются в большей степени. Например, короткие волны солнечного света, проникающие через окно, выделяют четкий рисунок на полу, который показывает, что волны проходят по прямым линиям с незначительной дифракцией или распространением. Совсем иначе обстоит дело с более длинными звуковыми волнами. Если окно открыто, мы можем слышать практически все звуки снаружи, даже шум фургона за углом, хотя мы можем находиться в другом конце комнаты вдали от окна. Более длинные звуковые волны распространяются и изгибаются под прямым углом вокруг углов, так что получить звуковую тень от них практически невозможно. Кроме того, что касается отражения, то, по-видимому, площадь отражающей стенки должна быть сопоставима с длиной отражаемых волн. В случае света волны очень мелкие, следовательно, зеркало может быть очень маленьким и все же иметь возможность создавать отражение; но звуковые волны имеют большую длину, средняя длина волны речи (45 см) примерно в 700 000 раз длиннее длины волны желтого света (0,00006 см), следовательно, отражающая поверхность должна быть соответственно больше. Иллюстрация, возможно, прояснит это. Предположим, столб площадью в один квадратный фут выступает из поверхности воды. Мелкая рябь на воде легко отражается от столба, но большие волны проходят мимо, как будто столба там и не было. Отражающая поверхность должна иметь площадь, сравнимую с размером волны, если она должна вызывать эффективное отражение. Рельефные работы в аудиториях, если они небольших размеров, будут влиять только на высокие звуки, то есть на звуки короткой длины волны, в то время как низкие высокие звуки большой длины волны отражаются почти так же, как от довольно грубой стены. Также показано, что площадь отражающей поверхности зависит от ее удаленности от источника звука и от наблюдателя; чем больше эти расстояния, тем больше должна быть отражающая поверхность.¹⁹

Все эти соображения показывают, что отражение звука - сложный вопрос. Размеры стены, отражающей звук, или рельефных работ, рассеивающих его, определяются длиной волны и различными другими упомянутыми факторами. Следует с осторожностью сказать, что "луч" звука определенным образом отражается от небольшого фрагмента рельефной работы. Мы должны иметь дело с *пучками* звука, не слишком резко ограниченными, и заставлять их ударяться о поверхности значительной площади, чтобы создавать отражения с любой полнотой.

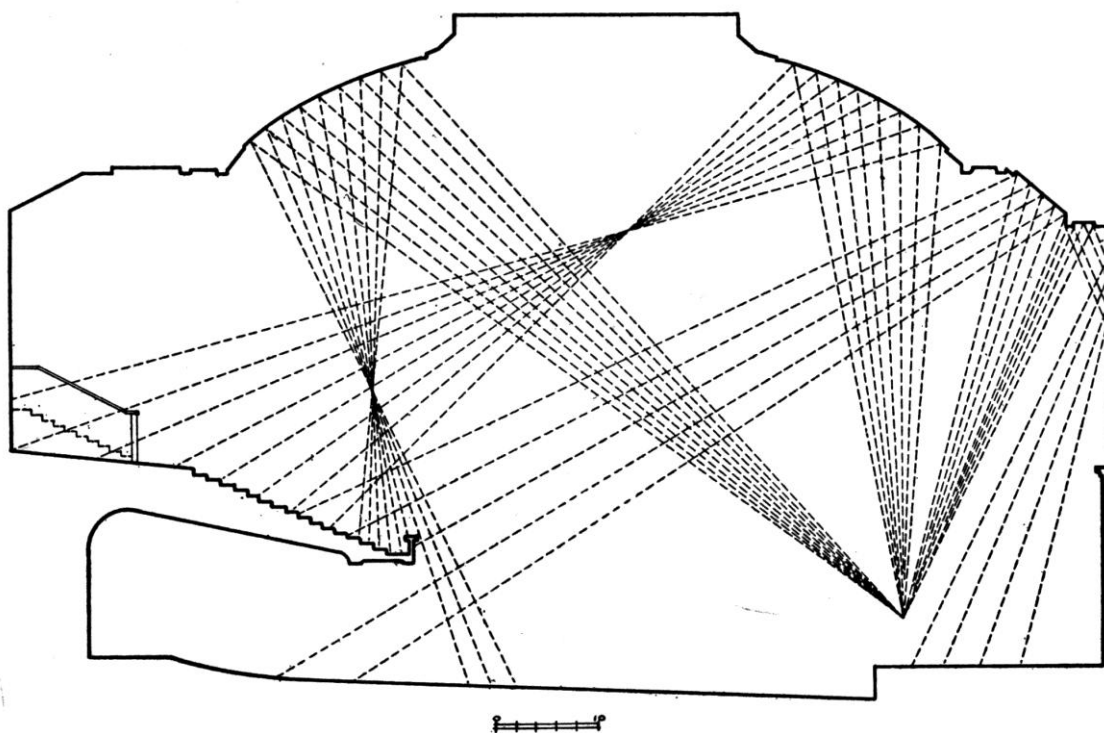


Рис. 7. Продольный разрез, показывающий основные концентрации звука, без учета эффектов дифракции.

В. ДЕТАЛИ АКУСТИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ В ЗРИТЕЛЬНОМ ЗАЛЕ.

Общее влияние стен аудитории на звук можно предвидеть, рассмотрев аналогичные случаи в геометрической оптике, но с ограничениями на “лучи”, описанными в предыдущем параграфе. Звук на самом деле не ограничивается показанными резкими границами. Диаграммы предназначены для обозначения основного эффекта звука в области, ограниченной таким образом. Рис. Рис. 7 дает такое представление о концентрации звука в продольном сечении Зрительного зала.

План, которому следовали в экспериментальной работе, состоял в том, чтобы спрогнозировать траекторию звука, как показано на рис. 7, затем проверить результаты с помощью дугового отражателя. На рис. 8 и 9 показано влияние задней стены балкона на формирование эха на сцене. Говорившему особенно не повезло, поскольку на него обрушилось не менее десяти отголосков.

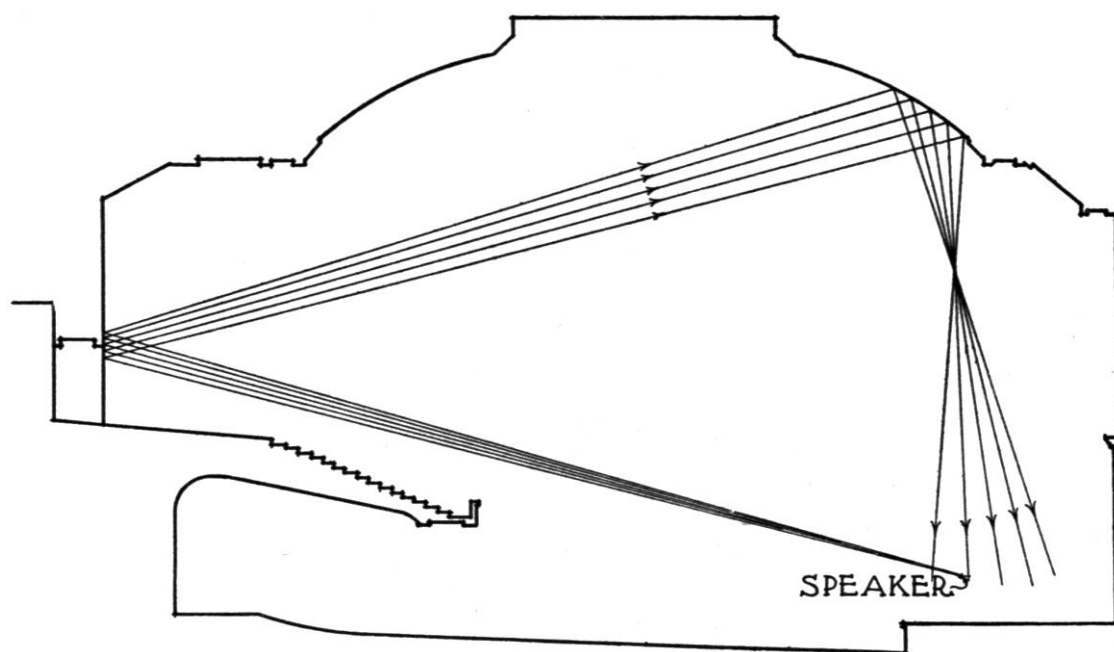


Рис. 8. Продольный разрез, показывающий, как звук возвращается на сцену для формирования эха.

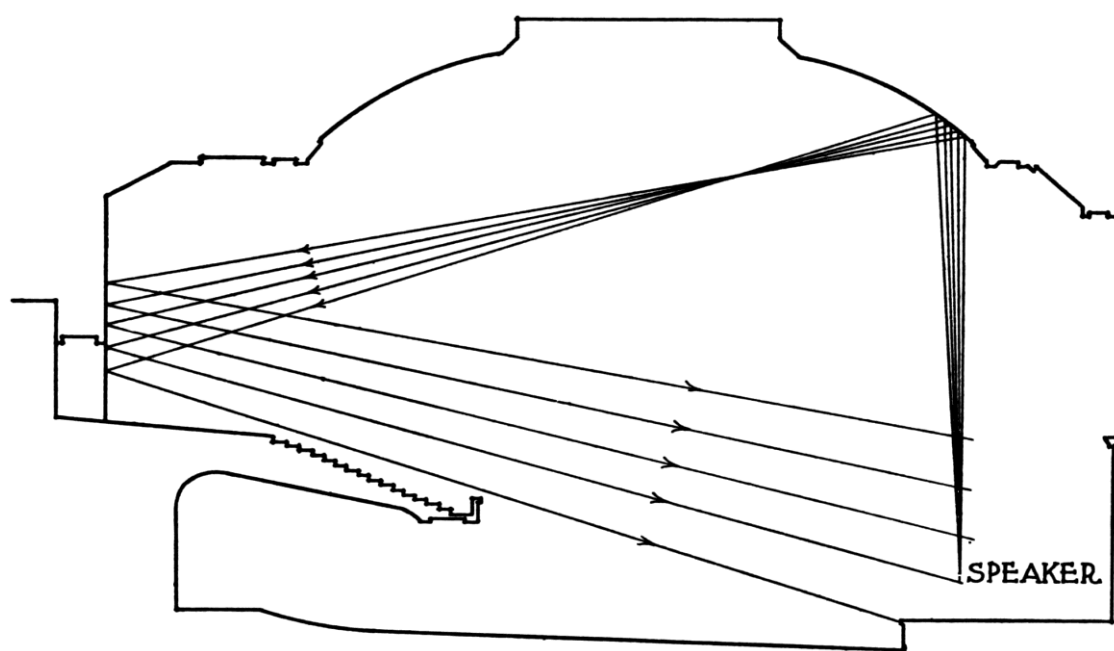


Рис. 9. Продольный разрез, показывающий формирование эха на сцене.

Твердая, гладкая, круглая стена, ограничивающая основной этаж под балконом, давала эхо, как показано на [рис. 10](#), звук также шел в направлении, обратном направлению стрелок.

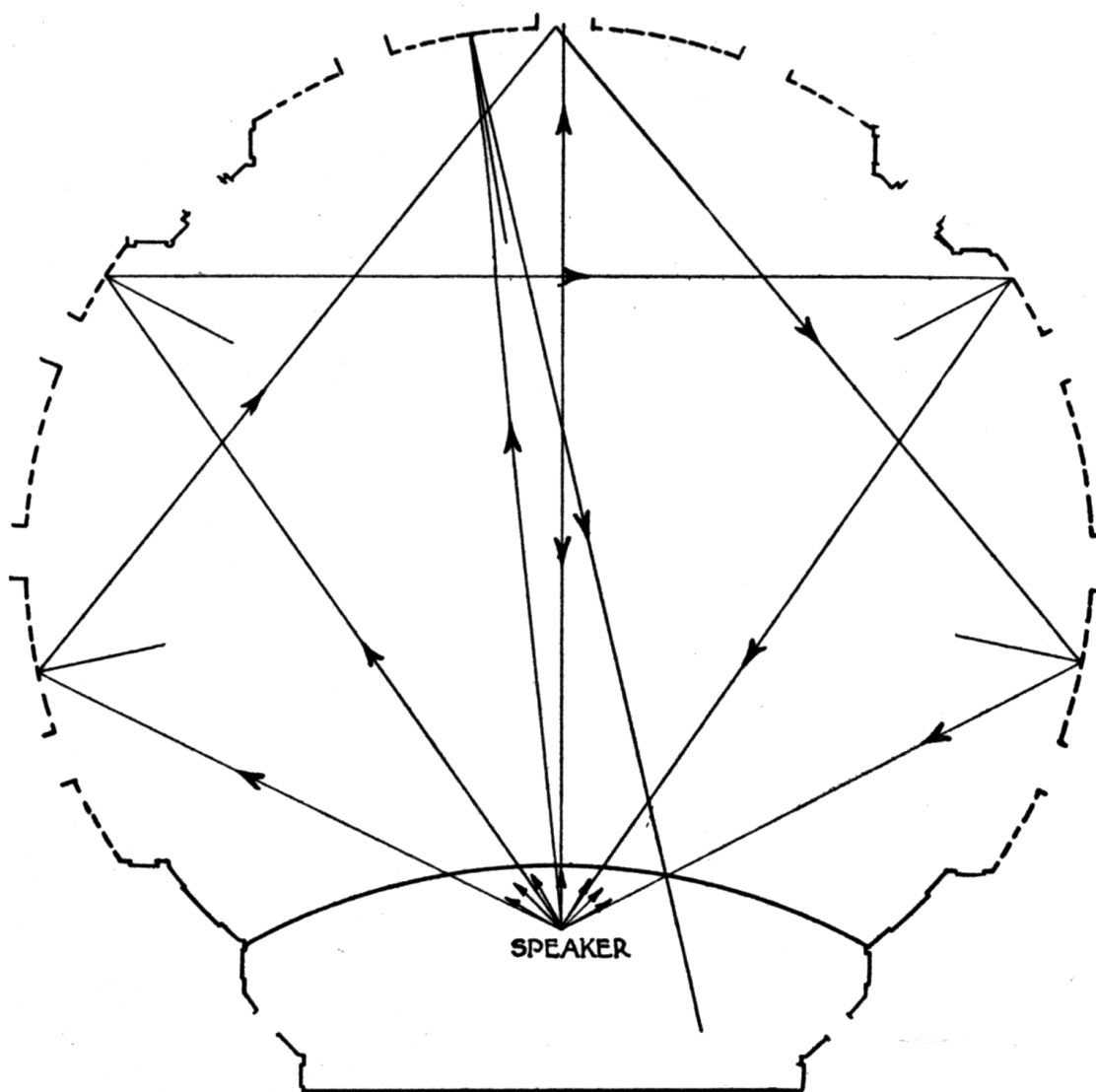


Рис. 10. План зрительного зала, показывающий влияние задней стены на звук.

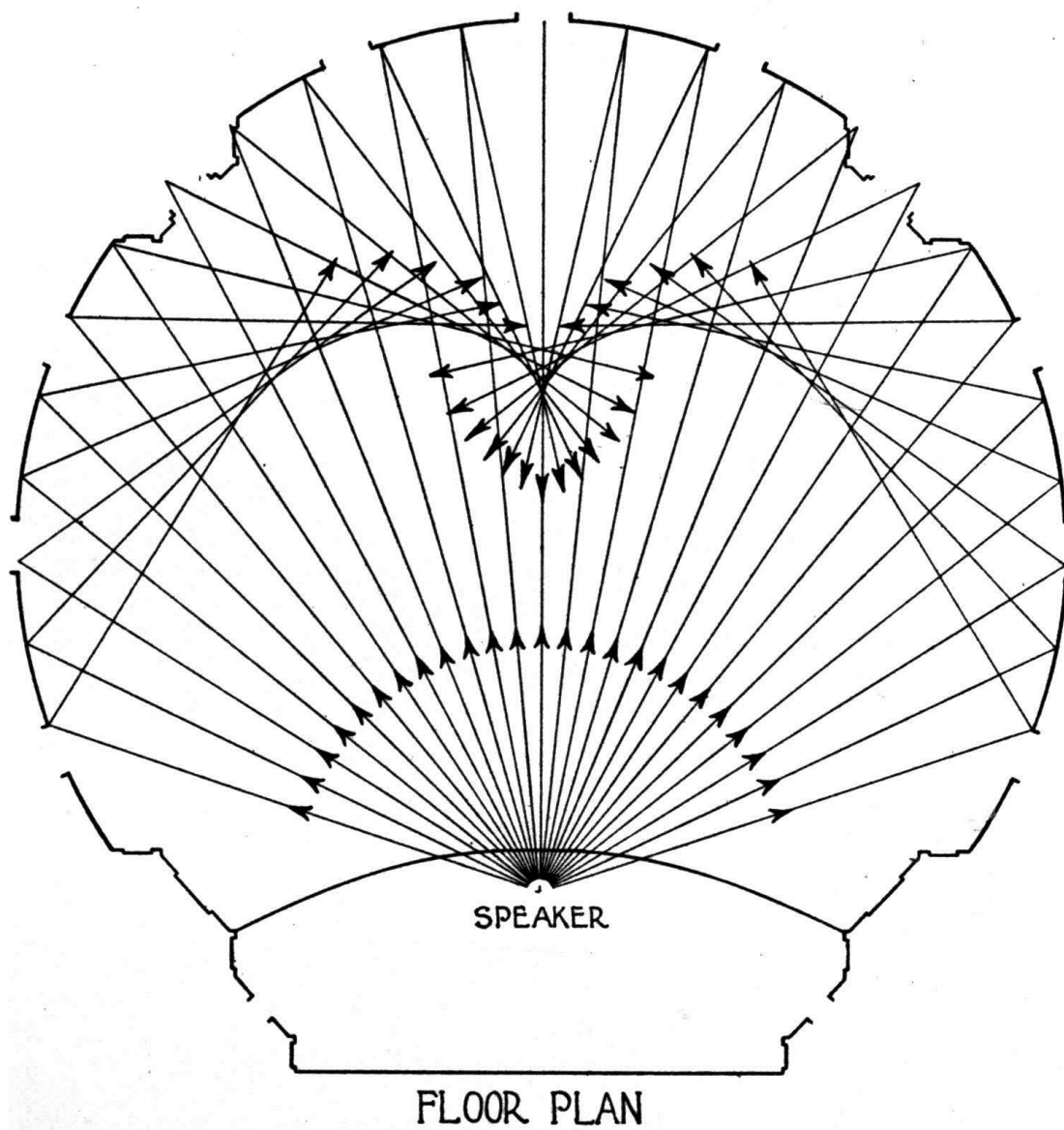


Рис. 11. План зрительного зала, показывающий концентрацию звука у задней стены.

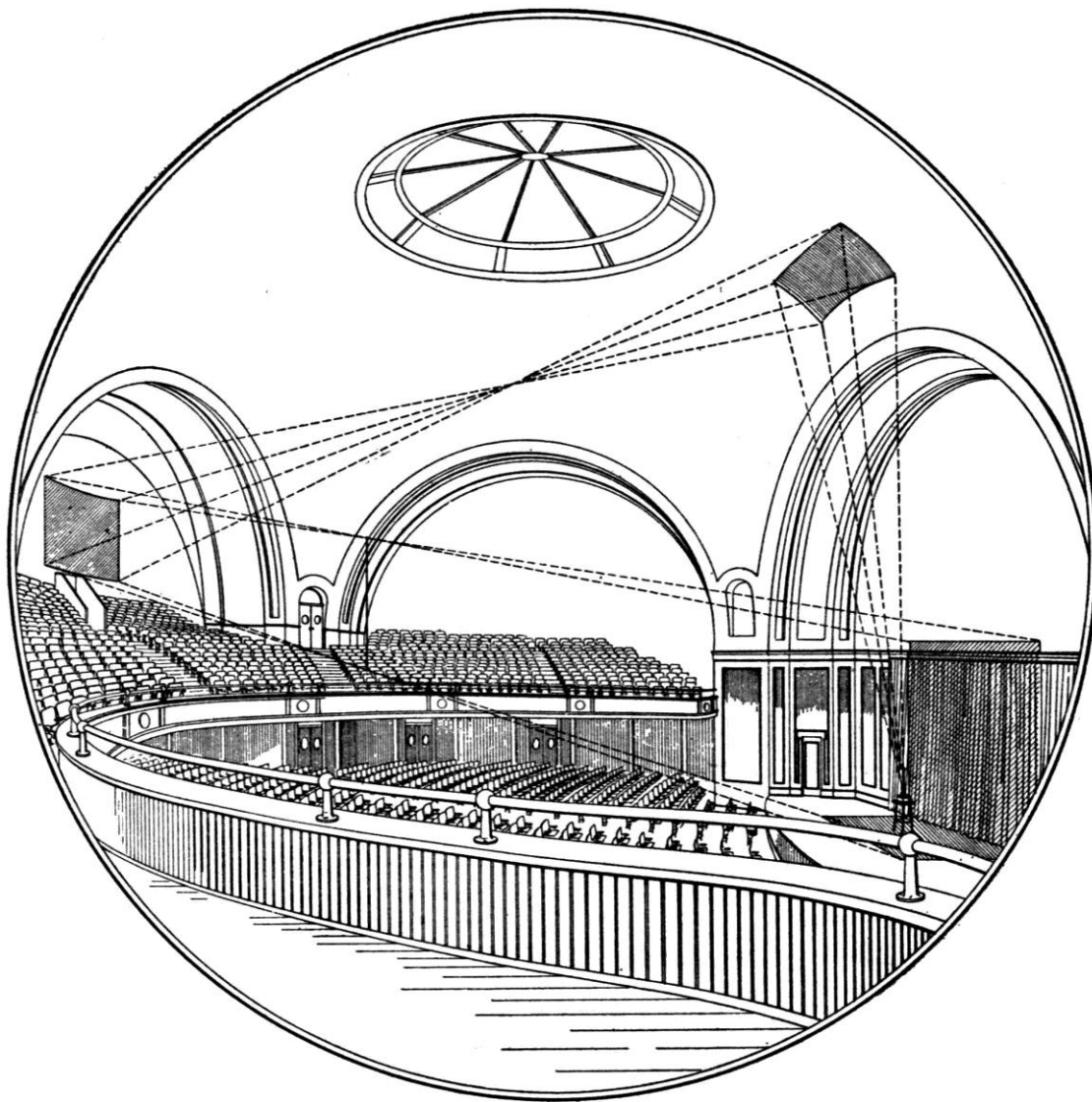


Рис. 12. Этот рисунок, взятый с [рис. 9](#), показывает, как настраивается эхо-сигнал на сцене.

Более полное представление о действии этой стены показано на [рис. 11](#). Этот отраженный звук был небольшим по величине и поэтому не являлся серьезным недостатком.

Приведенные случаи было довольно легко определить, поскольку рассматриваемые пучки звука были тесно связаны либо с вертикальной, либо с горизонтальной плоскостью, для которой планы здания давали некоторое представление о вероятном пути распространения звука. Для других плоскостей пройденные пути можно было бы предвидеть по аналогии с уже полученными результатами. На [рис. 12](#) показано в перспективе развитие результата, выраженного на [рис. 9](#).

Квадратный пучок звука исходит со сцены и ударяется о сферическую поверхность купола. После отражения он фокусируется, как показано на рисунке, и распространяется до тех пор, пока не упрется в вертикальную цилиндрическую стену в задней части балкона. Эта стена отражает его в линейном фокусе, после чего он переходит на сцену. Аудиторы во всех частях сцены жаловались на слышимое эхо.

Обращаясь к [рис. 7](#), видно, что арка над сценой отражает звук обратно на сцену. На [рис. 13](#) показано в перспективе фокусирующее действие этой арки над головой. На [рис. 14](#) показан

эффект второй арки. Часть этого звука отражается от сцены и кресел перед сценой; другие части, расположенные ближе к горизонтали, отражаются от боковых балконов. Эхо не очень сильное, за исключением высоких нот с короткой длиной волны, поскольку ширина арки невелика.

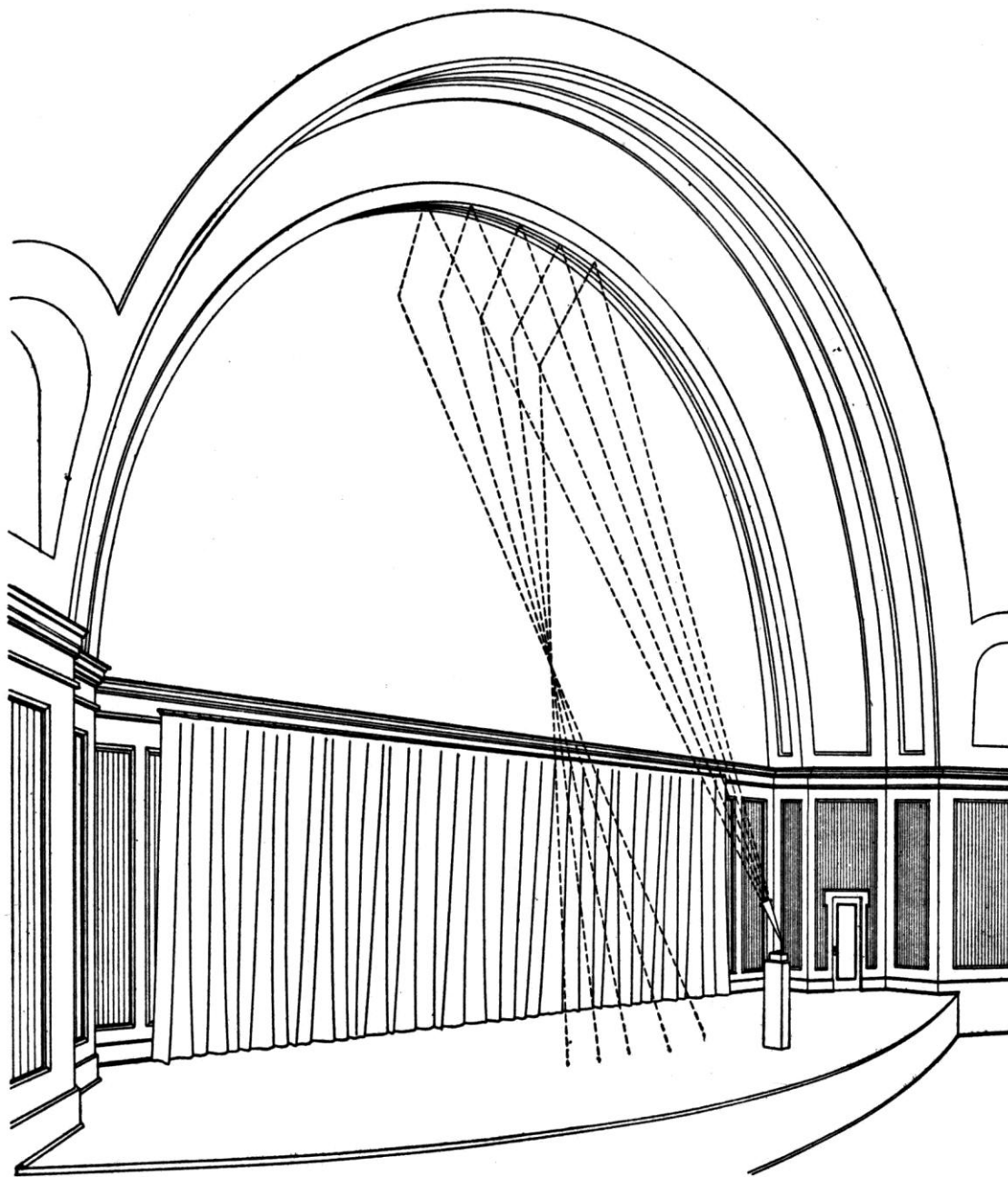


Рис. 13. Перспектива сцены, показывающая Фокусирующее действие Арки на звуке.

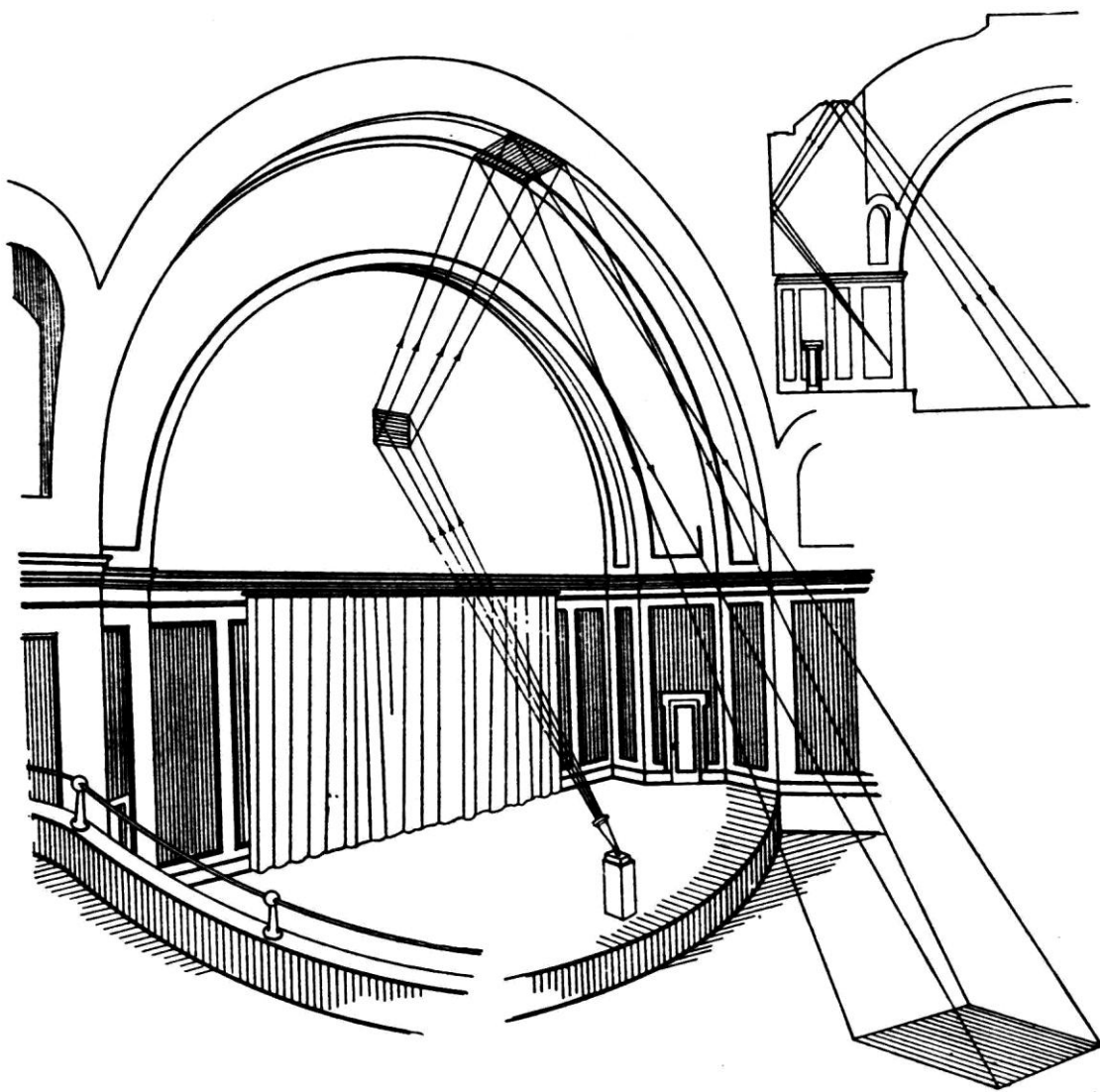


Рис. 14. Перспектива сцены, Показывающая Фокусирующее действие Второй арки.

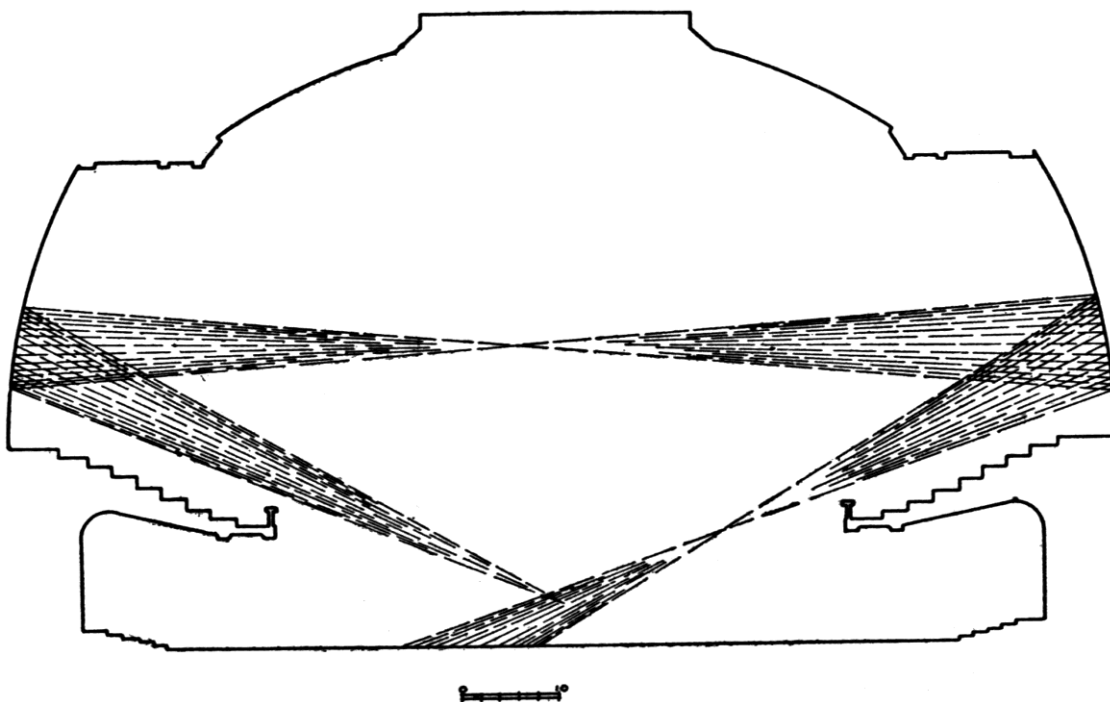


Рис. 15. Поперечный разрез, показывающий, как две вогнутые поверхности Создают наиболее выраженные эхо-сигналы.

Переходя теперь к поперечному сечению, [рис. 15](#), мы обнаруживаем наиболее выраженное эхо в Зрительном зале. Если наблюдатель издает звук в центре комнаты, прямо под центром светового люка, создается отчетливое эхо. Пучок звука проходит к вогнутой поверхности, которая сводит звук к фокусу, после чего он снова распространяется к другой вогнутой поверхности и снова сходится к фокусу почти в начальной точке. Пройденное расстояние составляет около 225 футов, что занимает около $\frac{1}{4}$ секунды, так что условия подходят для создания сильного эха. Это эхо дублируется звуком, который распространяется в обратном направлении по только что описанному пути. Другое эхо, несколько менее сильное, образуется звуком, который достигает купола над головой и отражается почти прямо обратно, поскольку наблюдатель находится почти в центре сферы, частью которой является купол. Это эхо повторяется само по себе, поскольку звук не прекращается, достигнув начальной точки, а отражается от пола и повторяет только что описанное действие. Одним звуковым импульсом было сгенерировано до десяти отчетливых эхо-сигналов.

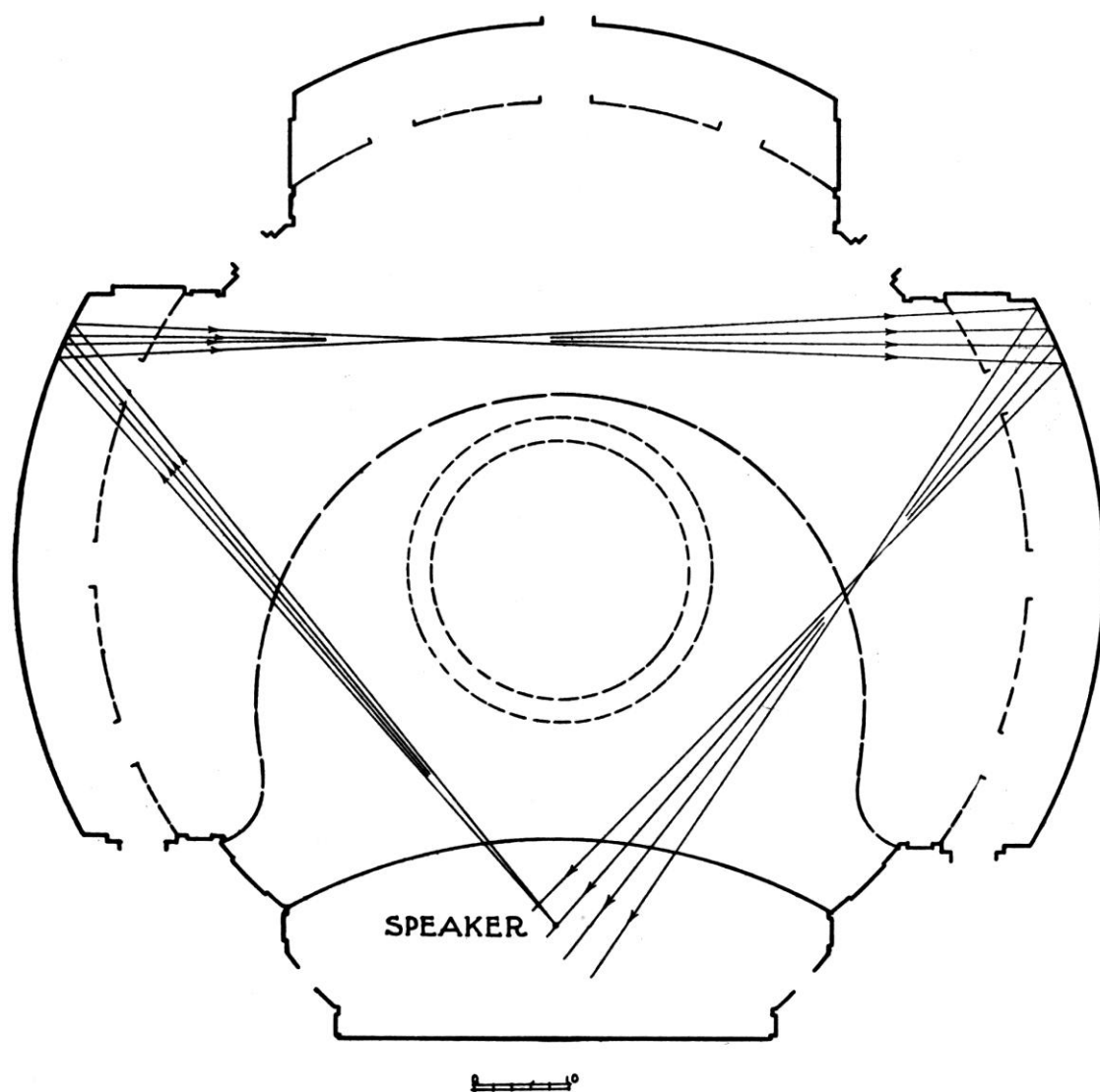


Рис. 16. Действие звука, вызывающего эхо на сцене.

Эхо, показанное на [рис. 15](#), повторяется в несколько измененной форме для звука, генерируемого на сцене громкоговорителем. На [рис. 16](#) показан путь, пройденный звуком. Это эхо дублируется звуком, который идет в направлении, обратном направлению стрелок,

поэтому говорящего приветствуют с обеих сторон. [Рис. 17](#) представляет собой перспективу, показывающую путь. Звук не ограничивается геометрическим рисунком, как показано на рисунке, а распространяется за счет дифракции. Основной эффект показан на рисунке.

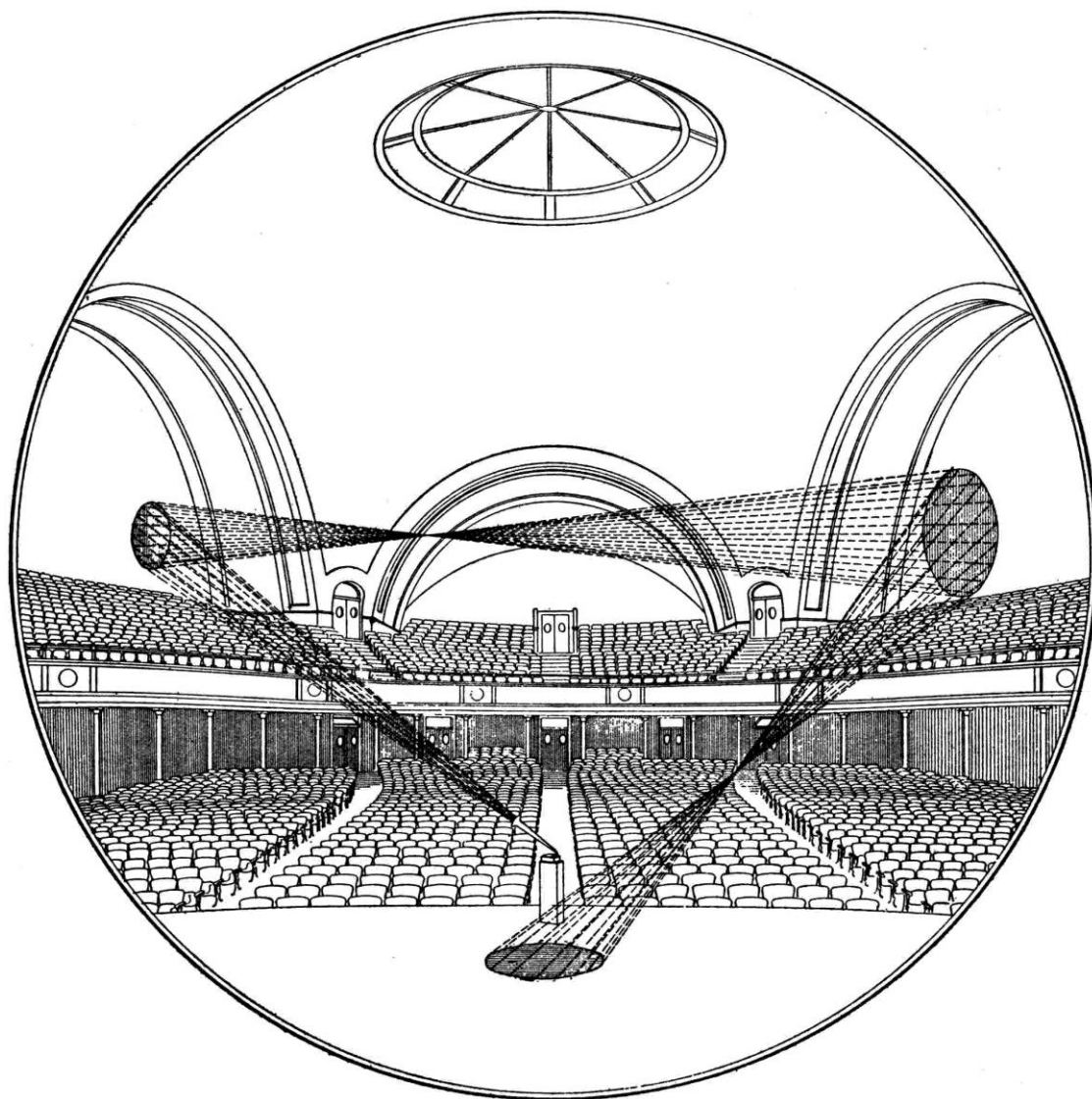


Рис. 17. Перспектива, показывающая, как эхо формируется на сцене двумя отражениями. Эффекты дифракции на этом чертеже не рассматриваются.

Пока описано только эхо, долетавшее до сцены. Другие отголоски были обнаружены в других частях зала, и казалось, что лишь немногие места были свободны от них. Боковые стены балкона, например, сыграли важную роль в создании сильного эха в задней части балкона. [На рис. 18](#) показано в перспективе действие одной из этих стен. Эти две поверхности были похожи по форме и расположены симметрично. Каждый представлял собой верхнюю часть вогнутой поверхности с центром кривизны в центре здания под куполом. Общий эффект левой стены заключался в том, чтобы сконцентрировать звук, падающий на нее, на сиденьях по правую руку на балконе. Часть звука ударились о противоположную стену и отразилась от сцены, как показано на [рис. 17](#). Аудиторы, которые искали самые дальние места на балконе, чтобы избежать эха, были, таким образом, захвачены этим неожиданным действием звука. Аналогично действовала правая стена, посылая звук на верхний левый балкон.

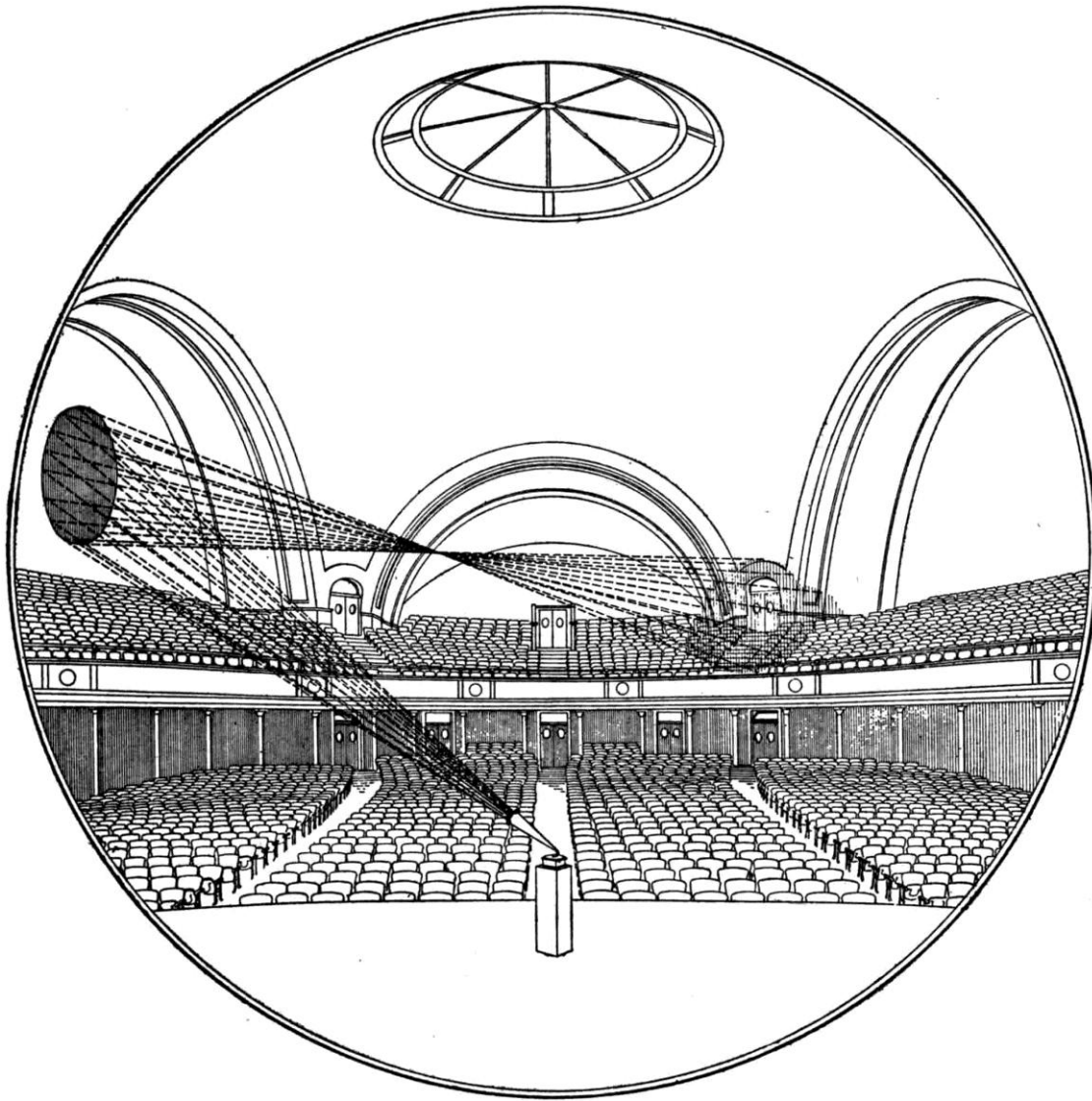


Рис. 18. Перспектива, показывающая звук, отраженный от вогнутой стены на балконе. Дифракция не учитывается.

Поверхность купола концентрирует большую часть звука в передней части центральной части балкона и на первом этаже перед балконом в форме едкого конуса. Рис. 7, 9 и 11 дают некоторое представление о том, как эта сферическая поверхность вызывает концентрацию звука. Эхо в передней части балкона было особенно отчетливым. Однажды в этом месте автор смог услышать говорящего более отчетливо по эху, чем при прослушивании прямого звука.

Незначительное эхо создавалось горизонтальными поверхностями арок на балконе. Звук со сцены концентрировался за счет отражения от этих поверхностей, а затем передавался второму отражению от вогнутых поверхностей за ними. Таким образом, аудиторы на боковом балконе были неприятно поражены звуком, доносившимся сверху с тыла.

С. ЗАКЛЮЧЕНИЕ, СДЕЛАННОЕ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ.

Результаты исследования показывают, что изогнутые стены в значительной степени ответственны за образование эха, поскольку они концентрируют отраженный звук. Поэтому представляется желательным подчеркнуть опасность использования таких стен, если только

их действие не сводится на нет впитывающими материалами или рельефными работами. Большие залы с изогнутыми стенами почти наверняка имеют акустические дефекты.

Д. МЕТОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ АКУСТИКИ.

Отражающие доски.— Временное излечение было достигнуто постепенно путем применения различных устройств, предложенных диагнозом. В одной серии экспериментов использовались деки различных форм и размеров. Плоская доска площадью около пяти квадратных футов, размещенная под наклоном над местом расположения динамика, произвела незначительный эффект. Брезентовая поверхность большего размера, примерно 12 на 20 футов, была ненамного лучше. Параболический отражатель, однако, давал выраженный эффект. Этот отражатель был установлен над кафедрой в одном конце сцены и служил для улавливания большей части звука, который в противном случае достиг бы купола и вызвал бы эхо. Траектория отраженного звука была параллельна оси параболоида, четверть сечения которого составлял отражатель. Отследить отраженный звук не составило труда. Аудиторы, находящиеся на пути отраженных лучей, сообщили об эхе, но аудиторы в других частях аудитории были на удивление свободны от обычных проблем. Устройство не использовалось постоянно, поскольку многие выступающие возражали против приподнятой платформы. Более того, это не было полным лекарством, поскольку оно не подходило для концертов группы и других мероприятий, где использовалась вся сцена. Другой отражатель, подобный по форме только что описанному, показан на [фиг. 21](#) и [22](#).

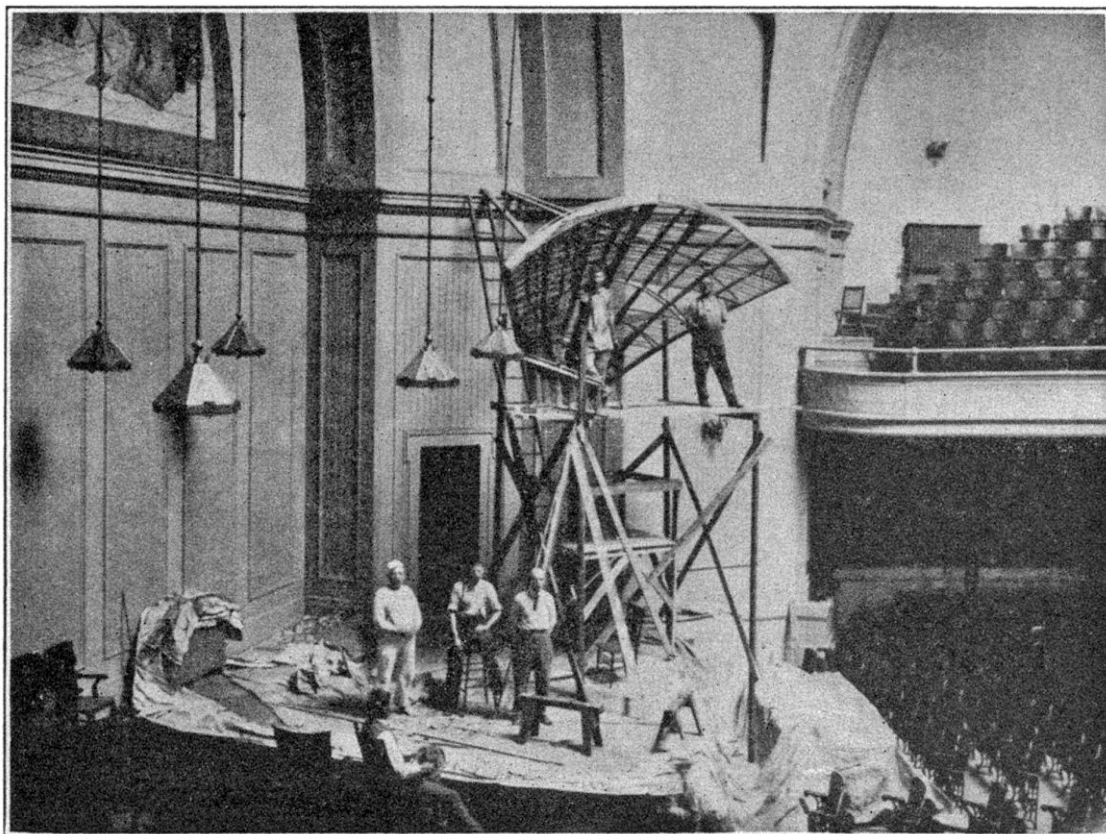


Рис. 19. Отражающая панель в процессе изготовления.

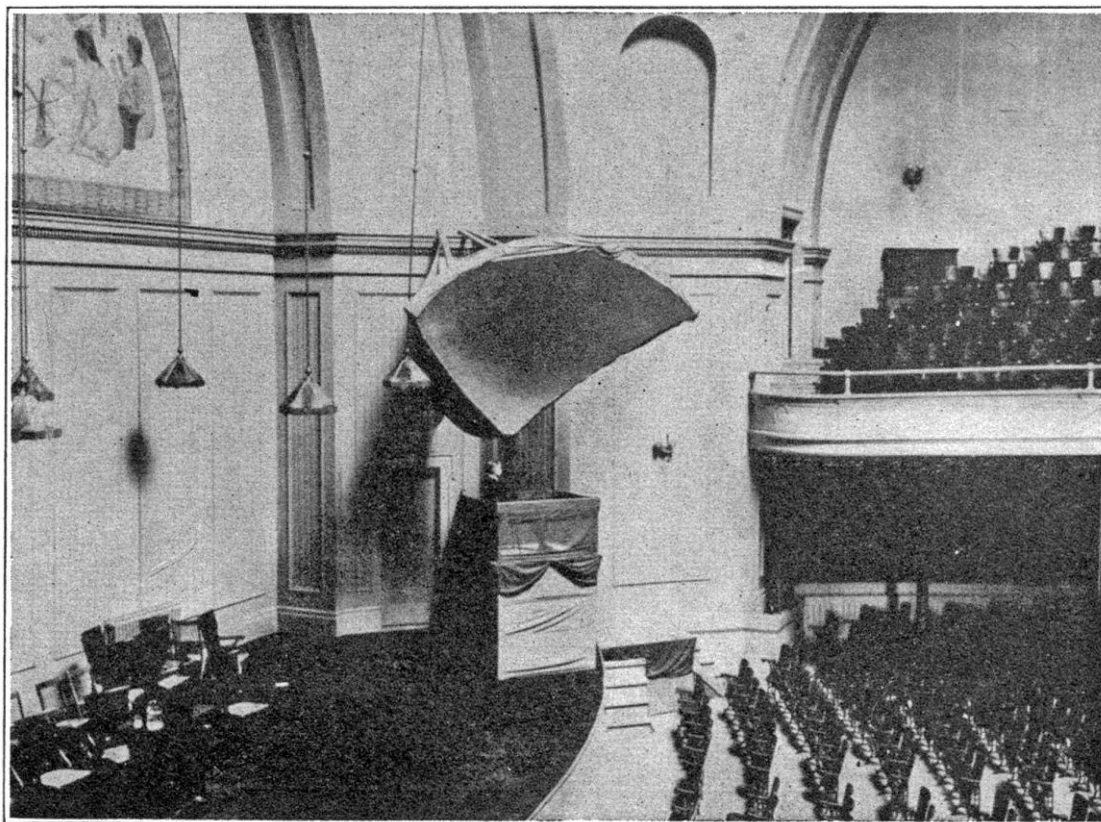


Рис. 20. Готовый отражатель. Твердая штукатурка на проволочной планке.

Метод Сабины.—Время реверберации определялось методом Сабины. В трубу органа, производящую примерно 526 колебаний в секунду, дули около трех секунд, а затем остановили. Аудитор прислушался к затихающему звуку, а когда он стих, сделал электрическую запись на барабане хронографа. Было обнаружено, что время реверберации составляет 5,90 секунды, что является средним значением для 19 наборов измерений, каждый из примерно 20 наблюдений. Реверберация была найдена также путем расчета по уравнению Сабины (см. [Раздел III](#)), взяв объем аудитории за 11 800 кубических метров и рассчитав поглощающую способность всех поверхностей в помещении. Этот расчет дал 6,4 секунды. Соответствие между двумя результатами настолько близко, насколько можно было ожидать, поскольку ни интенсивность звука, ни высота тона, использованные автором, не совпадали с теми, которые использовала профессор Сабина, и оба этих фактора влияют на время реверберации.

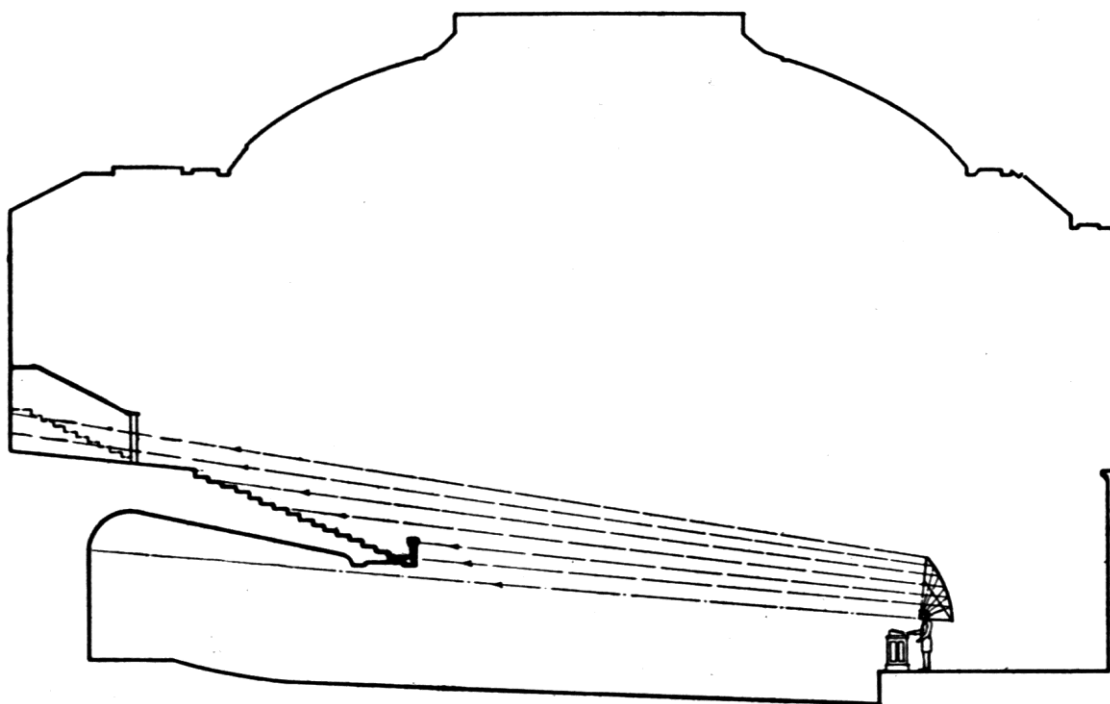


Рис. 21. Параболический отражатель, показывающий его воздействие на звук.

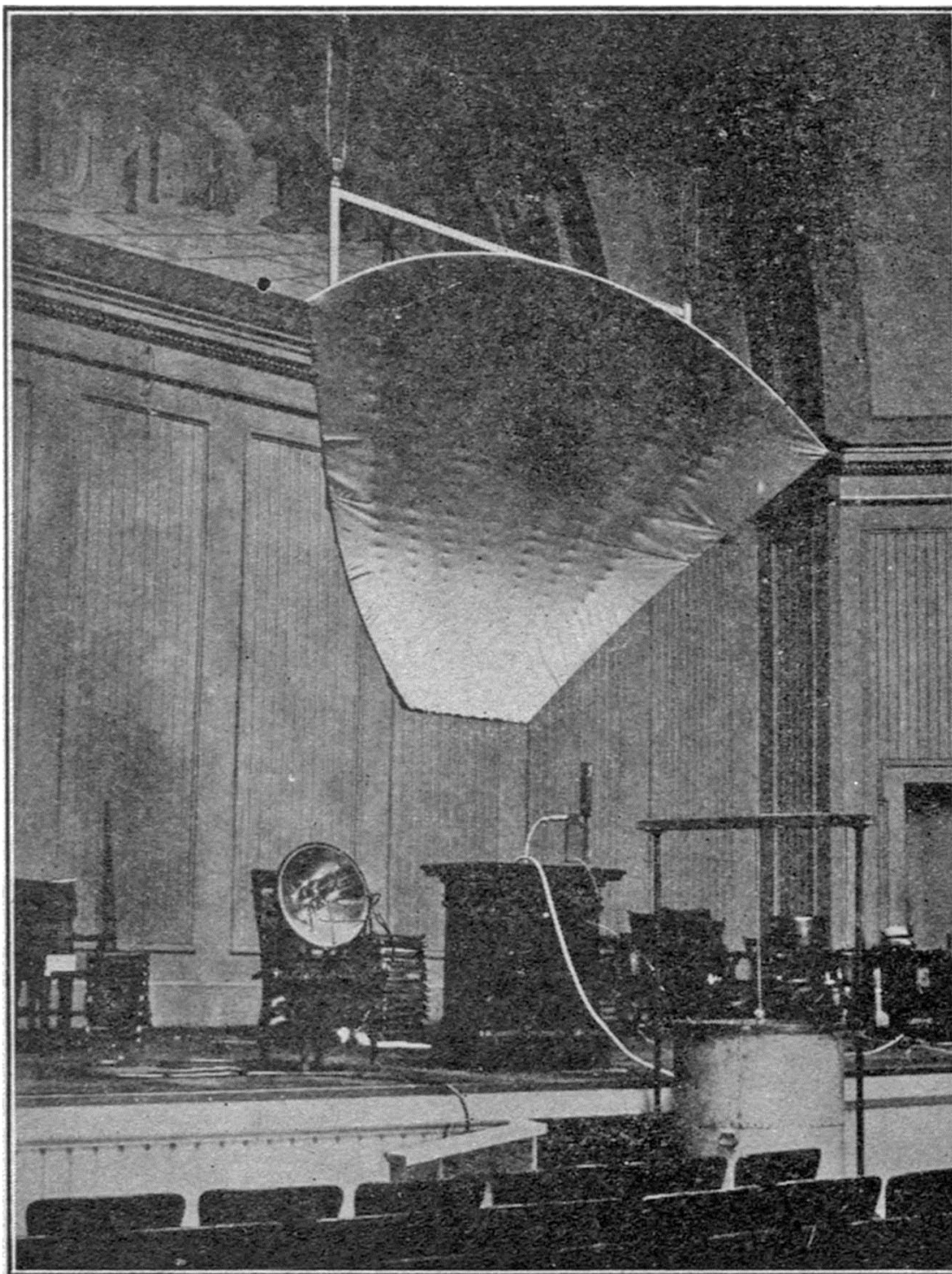


Рис. 22. Фотография параболического отражателя.

Несколько лет спустя время реверберации было снова определено после внесения определенных изменений. На сцене был постелен толстый ковер, на стене в задней части сцены висели тяжелые велюровые шторы размером 18 на 32 фута, была установлена большая картина на холсте площадью 400 квадратных футов, а из слухового окна в потолке было удалено стекло. Время реверберации было сокращено до 4,8 секунды. В присутствии аудитории это значение было снижено еще больше, и когда зал был переполнен во время начала, реверберация не доставляла хлопот.

Способ устранения эхо-сигналов.—Хотя время реверберации было сокращено до вполне удовлетворительного, как только что было объяснено, эхо все еще сохранялось и было очень

раздражающим. Были предприняты попытки уменьшить отдельные эхо-сигналы, повесив хлопчатобумажную фланель на стены в критических точках. Таким образом, были покрыты затененные участки на [рис. 17](#), а также вся задняя стена балкона. Отчетливые отголоски все еще оставались, и было очевидно, что необходимы какие-то решительные действия, чтобы облегчить это состояние. Четыре больших полотна, показанные на [фиг. 23](#) и [24](#) затем были подвешены к куполу в положении, предполагаемом результатами диагностики. Последовало решительное улучшение. Впервые эхо было уменьшено до заметной степени, и выступающие на сцене могли говорить без обычного раздражения. Такое расположение устраняло эхо не только на сцене, но и в целом по всему залу. Некоторое количество незначительного эха все еще оставалось, но условия были значительно улучшены, особенно когда присутствовала большая аудитория, чтобы уменьшить реверберацию.

Предлагаемое окончательное лекарство.—Только что описанное состояние соответствует состоянию на момент написания статьи. При планировании the final cure были учтены два предложения. Одно из предложений включало полную реконструкцию интерьера аудитории. Планы интерьера были составлены в соответствии с результатами экспериментальной работы, которая, вероятно, обеспечила бы удовлетворительную акустику. Это предложение не было реализовано из-за дороговизны и потому, что было сочтено желательным попытаться вылечить без изменения формы помещения. Сейчас используется последний план. Предлагается заменить нынешние неприглядные шторы материалами, которые будут соответствовать архитектурным особенностям Зрительного зала и иметь приятную цветовую гамму. В то же время необходимо будет придерживаться функций, которые улучшили акустику.

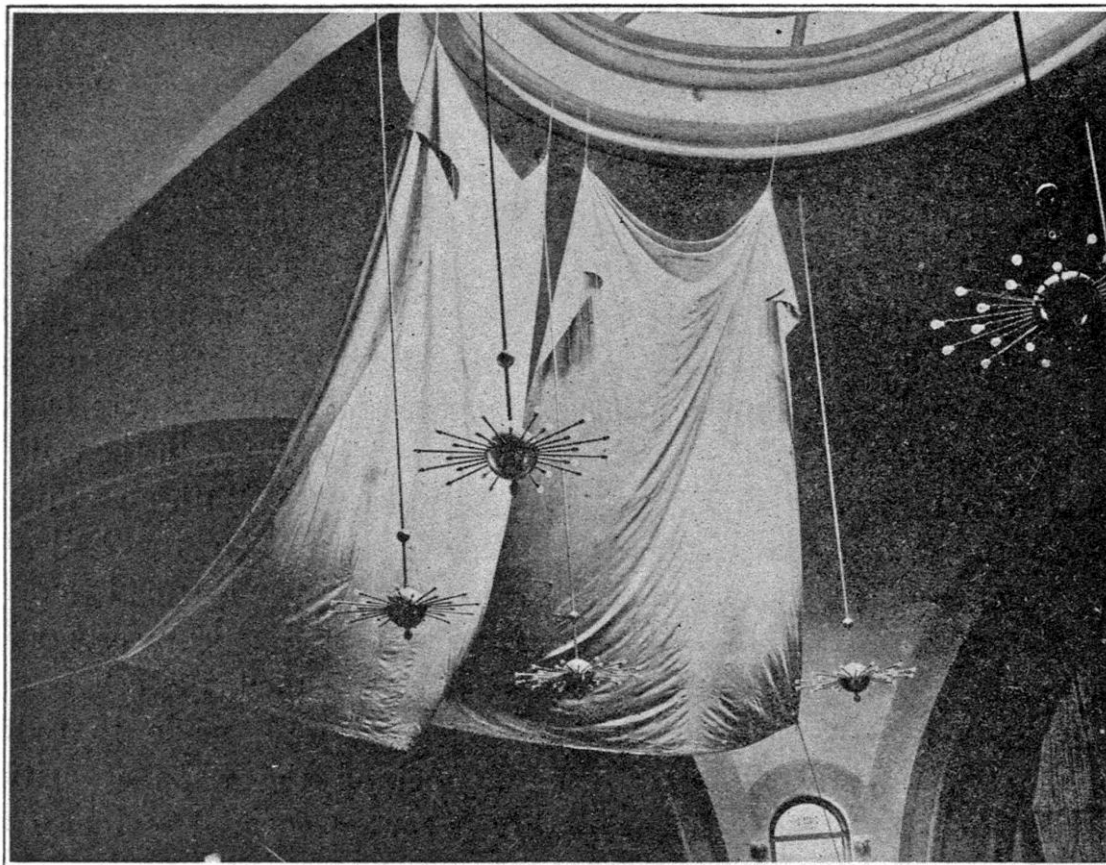


Рис. 23. Фотография двух полотняных занавесок в куполе зрительного зала. Обратите внимание также на поглощающие материалы под арками.

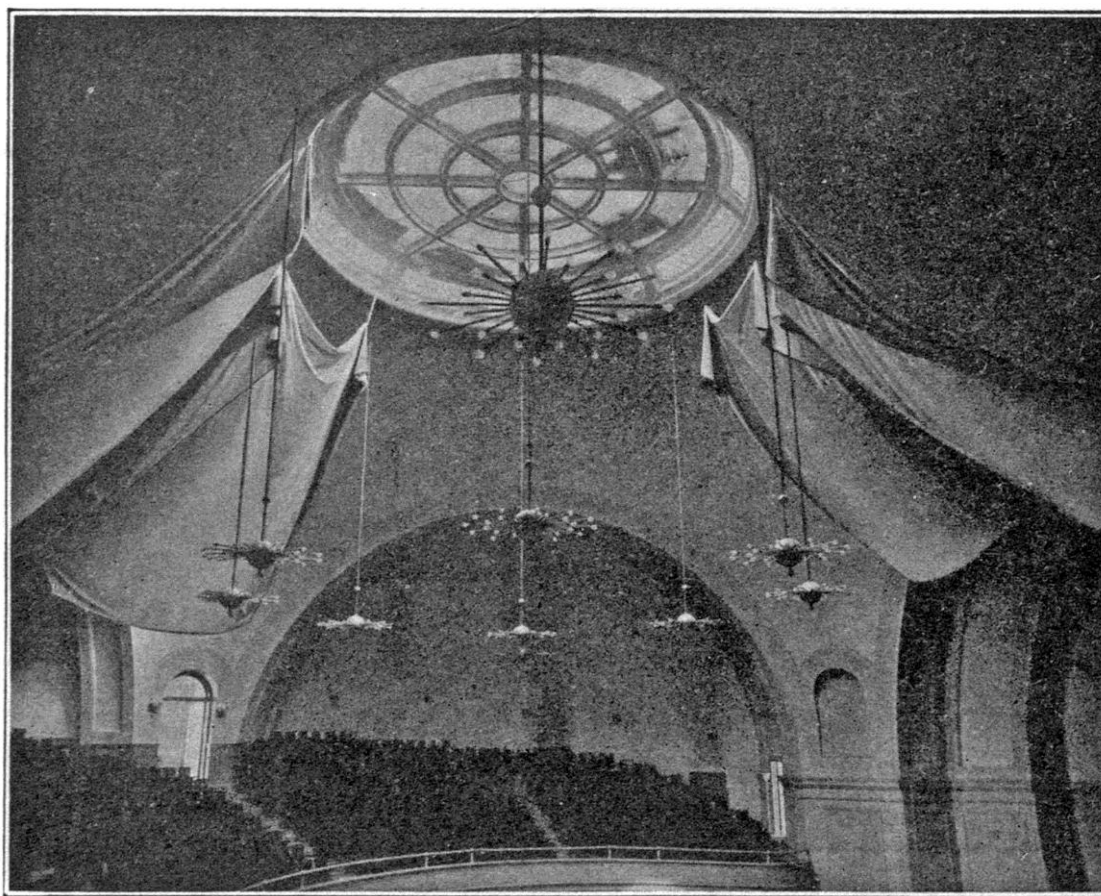


Рис. 24. Фотография купола зрительного зала, на которой показаны полотна, установленные для устранения эха.

V. Библиография публикаций по акустике аудиторий.

Auerbach, F. “Akustik.” Winkelmann’s Handbuch der Physik, Vol. II, 1909. Энциклопедия акустики, следующие разделы, относящиеся к рассматриваемому предмету: “Акустика в технике”, стр. 580-584, со ссылками. “Нахалль и эхо”, стр. 565-569, со ссылками.

Блэколл, К. Х. “Акустика аудиенц-залов”, Инженерный отчет, том 45, стр. 541-542, 1902. Статья, в которой излагается мнение автора со множеством ссылок на акустические свойства конкретных аудиторий.

Корнелисон Р. В. “Акустические свойства помещений, особенно подверженные влиянию настенных покрытий”, 1905. Брошюра, описывающая достоинства мешковины “Fabrikona” в качестве звукопоглощающего материала. Компания H. B. Wiggin Sons Company, Блумфилд, Нью-Джерси

Eichhorn, A. “Die Akustik Grosser Räume nach Altgriechischer Theorie.” Ernst and Korn, Publishers, Berlin, 1888. Обсуждение греческих зданий и акустики с приложениями к современным условиям.

Eichhorn, A. “Der Akustische Masstab für die Projectbearbeitung Grosser Innen Räume.”

Опубликовано Шустером и Буфлебом, Берлин, 1899. Продолжение предыдущей работы.

Exner, S. “Über die Akustik von Hörsälen und ein Instrument, sie zu bestimmen.” Zeitschrift des Österreichischen Ingenieur und Architekten-Vereines, Vol. LVII, стр. 141, март 1905 г. Указывает его мнение о хороших акустических свойствах зала. Дает экспериментальное определение реверберации.

Fournier, Lucien. “Подавление эха”. La Nature (Париж), 24 апреля 1909. Английский перевод дан в “Литературном дайджесте”, Нью-Йорк, 29 мая 1909 г., стр. 924. Отчет об экспериментах Густава Лайона по исследованию эха в зале Трокадеро в Париже.

Франклин, У. С. “Вывод уравнения затухающего звука в помещении и определение эквивалента поглощающей способности открытого окна”. Физическое обозрение, Том 16, стр. 372-374, 1903. Теоретическое развитие формулы, найденной экспериментально Сабиной.

Хаере. “Bemerkungen über Akustik.” Zeitschrift für Baumesen, Vol. IX, стр. 582-594, 1859.

Генри, Джозеф. “Акустика, применяемая к общественным зданиям”, Отчет Смитсоновского института, 1856, стр. 221.

Хойт, Дж. Т. Н. “Акустика мемориального зала Хилл”, американский архитектор, T. CIV, стр. 50-53, 6 августа 1913г. Обсуждает дизайн зала и указывает, как он соответствует его представлениям о хорошей акустике.

Хаттон, У. Р. “Архитектурная акустика; Зал представителей, Капитолий США, 1853 год”. Инженерный отчет, Том 42, стр. 377, 1900. Обсуждение устранения неисправной акустики в Зале представителей США.

Жак, У. У. “Влияние движения воздуха внутри аудитории на ее акустические качества”. Философский журнал (5), т. 7, с. III, 1879. Запись экспериментов, проведенных в Балтиморской музыкальной академии, показывающая, что вентиляционный ток оказывал заметное воздействие на акустику.

Jager, S. “Zur Theorie des Nachhals,” Sitzungsberichten der Kaiserl. Akademie der Wissenschaften in Wien. Mathematik.-naturw. Class; Bd. CXX, Abt. II, Mai, 1911. Важный документ, дающий теоретическое развитие формулы Сабины, показывающий факторы, которые входят в константы. Рассматривается также случай отражения звука от тонкой стены, а также случай, когда он сталкивается с пористым материалом, таким как занавеска.

Лэмб, Горацій. “Динамическая теория звука”. Опубликовано Эдвардом Арнольдом, Лондон, 1910. Более элементарная трактовка, чем “Теория звука” Рэлея.

Марадж. “Qualites acoustiques de certaines salles pour la voix parlée.” Comptes Rendus, Vol. 142, p. 878, 1906. Исследование акустических свойств шести залов в Париже.

Нортон, К. Л. “Звуконепроницаемые перегородки”. Страховая инженерия, Том 4, стр. 180, 1902. Отчет об экспериментальных испытаниях звукоизоляционных качеств материалов, которые также являются огнеупорными.

Orth, A. “Die Akustik Grosser Räume mit Speciallem Bezug auf Kirchen.” Zeitschrift für Bauwesen. Также перепечатано Эрнстом и Корном, Берлин, 1872. Предполагается, что звуковые волны ведут себя как световые волны. Обсуждаются, с подробными рисунками, пути

распространения звука в церкви Сиона в Берлине и Николаевской церкви в Потсдаме. Также высказывает свое мнение о влиянии поверхностей и материалов на звук.

Рэлей, лорд. “Теория звука”. Два тома, Макмиллан, 1896. Непревзойденная классика в области акустики. Ссылки на архитектурную акустику следующие: “Шепчущие галереи”, том. II, § 287. “Прохождение звука через ткани”, том. II, стр. 311. “Резонанс в зданиях”, том. II, § 252.

Сабина, Уоллес К. “Архитектурная акустика”. Инженерный отчет, 1900, Том 1, стр. 349, 376, 400, 426, 450, 477, 503. Опубликовано также в виде книги и в журнале *American Architect*, Том 68, 1900, стр. 3, 19, 35, 43, 59, 75, 83. Важная серия статей, в которых описывается взаимосвязь между временем реверберации в помещении, объемом помещения и присутствующими поглощающими материалами. Приводится таблица поглощающих способностей веществ, чтобы архитектор мог заранее рассчитать, каким будет время реверберации.

Сабина, В. С. “Архитектурная Акустика”, Тез. Докл. Амер. Акад. искусств и наук, том. XLII, № 2, июнь 1906 г. Продолжение предыдущей работы, демонстрирующее точность музыкального вкуса в отношении архитектурной акустики, а также вариации реверберации с изменением высоты звука.

Сабина, У. К. “Архитектурная акустика”, Инженерный отчет, том 61, стр. 779-781, 18 июня 1910 г. Обсуждается случай с потоком воздуха в помещении и его влиянием на акустику. Делается вывод, что обычная система вентиляции в зале оказывает очень слабое влияние.

Сабина, У. К. “Архитектурная акустика: исправление акустических трудностей”. Архитектурный кварталный журнал Гарвардского университета, март 1912 г., стр. 3-23. Отчет о способах устранения акустических проблем в ряде аудиторий, а также описание дальнейших экспериментов по изучению поглощающей способности различных материалов.

Сабина, У. К. “Театральная акустика”. Американский архитектор, том. CIV, стр. 257-279, 31 декабря 1913 г. Описывает театр с модельной акустикой. Обсуждается поведение звука в помещении и показываются фотографии звуковых волн в миниатюрных помещениях.

Сабина, У. К. “Архитектурная акустика. Строительные материалы и музыкальный слух”. Кирпичный строитель, том 23, стр. 1-6, январь 1914 г. Продолжение предыдущей работы, описывающей поглощающую способность различных материалов.

Шарп Х. Дж. “Отражение звука на параболоиде”. *Camb. Phil. Soc.* Сборник, Т. 15, с. 190-197, 1909.

Стюарт Г. В. “Архитектурная акустика”. Инженерный журнал Сибли, май 1903 г. Опубликовано Корнельским университетом, Итака, штат Нью-Йорк, Отчет об исследовании, приведшем к улучшению акустики аудитории Сибли.

Sturmhöfel, A. “Akustik des Baumeisters.” Опубликовано Шустером и Буфлебом, Берлин, 1894. 87-страничная брошюра по акустике помещений. Обсуждается влияние рельефа в помещениях на звук. Отчет об экспериментальной работе. Ссылки на аудитории.

Таллант, Хью. “Советы по архитектурной акустике”. Кирпичный строитель, Том 19, 1910, стр. 111, 155, 199, 243, 265. Серия статей, дающих изложение принципов предмета с практическими приложениями.

Таллант, Хью. “Акустический дизайн в мемориальной аудитории Хилл, Мичиганский университет”. The Brickbuilder, Vol. XXII, стр. 169, август 1913 г. Смотрите также листы 113, 114, 115. Обсуждение акустических результатов, полученных в этом зале, особенностью которого является действие огромной параболической отражающей поверхности стены над сценой.

Таллант, Хью. “Архитектурная акустика. Воздействие голоса говорящего в разных направлениях”. Кирпичный строитель, Том 22, стр. 225, октябрь 1913г.

Тейлор, Х. О. “Прямой метод определения ценности материалов как звукопоглощающих”. Физическое обозрение, Том 2 (2), стр. 270, октябрь 1913г.

Тафтс Ф. Л. “Передача звука через пористые материалы”. Американский. Научный журнал, том. II, стр. 357, 1901. Экспериментальная работа, приведшая к выводу, что звук передается через пористые материалы в той же пропорции, что и поток воздуха.

Уотсон, Ф. Р. “Эхо в аудитории”. Physical Review, Том 32, стр. 231, 1911. Аннотация, рассказывающая об экспериментах, проведенных в аудитории Иллинойского университета.

Уотсон, Ф. Р. “Неэффективность проводов как средства лечения дефектной акустики аудиторий”. Наука, Том 35, стр. 833, 1912.

Уотсон, Ф. Р. “Использование дек в аудитории”. Физическое обозрение, том 1 (2), стр. 241, 1913. Также более полная статья в The Brickbuilder, июнь 1913.

Уотсон, Ф. Р. “Воздушные потоки и акустика аудиторий”. Инженерный отчет, Том 67, стр. 265, 1913. Подробный отчет, содержащий теорию и экспериментальные работы применительно к системам вентиляции в аудиториях.

Уотсон, Ф. Р. “Акустический эффект звукопоглощающих материалов из огнестойкой хлопчатобумажной фланели”. Engineering News, Том 71, стр. 261, 29 января 1914 г. Результаты экспериментов, показывающие, что хлопчатобумажная фланель обладает практически такой же поглощающей способностью после огнестойкости, как и раньше.

Weisbach, F. “Versuche über Schalldurchlässigkeit, Schallreflexion und Schallabsorbtion.” Annalen der Physik, Vol. 33, p. 763, 1910.

Уильямс, У. М. “Эхо в Альберт-Холле”. Природа, Том 3, стр. 469, 1870-71. Наблюдения за формой Альберт-Холла в Лондоне и созданным эхом.

Примечание редакции. “Дрезденская лаборатория архитектурной акустики”. Американский архитектор, Том 102, стр. 137, 16 октября 1912 г. Заявляет, что лаборатория прикладной акустики авторизована в Дрездене (Германия) Высшая техническая школа, и что архитекторам и другим лицам будут предоставлены экспертные консультации относительно проблем акустики аудиторий.

Эдмунд Дж. Джеймс, доктор философии, доктор права, президент

В состав университета входят следующие кафедры:

Высшая школа

Колледж свободных искусств и наук (Древние и современные языки и литература; История, экономика и бухгалтерский учет, политология, социология; Философия, психология, образование; Математика; Астрономия; Геология; Физика; Химия; Ботаника, зоология, энтомология; Физиология; Искусство и дизайн; Керамика)

Инженерный колледж (Архитектура; Архитектурное, гражданское, электротехническое, механическое, горнодобывающее, коммунальное и санитарное, железнодорожное машиностроение)

Сельскохозяйственный колледж (Агрономия; Животноводство; Молочное животноводство; Садоводство и ландшафтный дизайн; Ветеринария; Повышение квалификации в области сельского хозяйства; Курсы для преподавателей; Наука о домашнем хозяйстве)

Юридический колледж (трехлетний курс обучения)

Школа образования

Курсы по бизнесу (Общий бизнес; Банковское дело; Бухгалтерия; Управление железнодорожным транспортом; Страхование)

Курс журналистики

Курсы химии и химической инженерии

Курсы керамики и керамической инженерии

Школа железнодорожной инженерии и администрации

Музыкальная школа (четырёхлетний курс обучения)

Школа библиотечного дела (двухлетний курс)

Медицинский колледж (в Чикаго)

Стоматологический колледж (в Чикаго)

Фармацевтическая школа (в Чикаго; курсы доктора философии)

Летняя сессия (восемь недель)

Экспериментальные станции: Сельскохозяйственная экспериментальная станция США; Инженерная экспериментальная станция; Государственная лаборатория естественной истории; Кабинет государственного энтомолога; Биологическая экспериментальная станция на реке Иллинойс; Государственная водная служба; Государственная геологическая служба; Горноспасательная станция

В библиотечных фондах содержится (на 1 мая 1914 г.) 295 000 томов, включая библиотеку Государственной лаборатории естественной истории, Медицинскую библиотеку Куайна и библиотеку Фармацевтической школы.

Для получения каталогов и информации обращайтесь по адресу

СНОСКИ

1“Теория звука”, том. II, стр. 316.

2“Теория звука”, том. II, § 351.

3“Динамическая теория звука”, стр. 196.

4“Теория звука”, стр. 333.

5“Архитектурная акустика”. Серия статей в журнале Engineering Record, 1900; также американский архитектор, 1900.

6“Архитектурная акустика”, профессор Амер. Академия. искусств и наук. Т. 42, с. 49-84, 1906.

7Г. В. Стюарт. “Архитектурная акустика”, Инженерный журнал Сибли, май 1903 г.
Опубликовано Корнельским университетом, Итака, Нью-Йорк

8“Qualités acoustiques de certaines salles pour la voix parlée.” Comptes Rendus, 142, 878, 1906.

9У. С. Франклин. “Вывод уравнения затухающего звука в помещении и определение эквивалента поглощающей способности открытого окна”. Физическое обозрение, Том 16, стр. 372-374, 1903.

10G. Jäger. “Zur Theorie des Nachhalls.” Sitzungsberichte der Kaiserliche Akad. der Wissenschaften in Wien, Math-naturw. Class; Bd. CXX. Около 11 мая 1911 года.

11Наука, Том 35, стр. 833, 1912.

12Свод. ежеквартальный журнал гарвардского университета, март 1912г.

13Осборн Рейнольдс. Материалы Королевского общества, Т. XXII, стр. 531, 1874.

14Джозеф Генри, “Отчет Совета маяков Соединенных Штатов за 1874 год”.

Дж. Тиндалл, филолог. Пер., 1874.

15Сабина, Инженерный отчет, Том 61, стр. 779, 1910. Уотсон, Инженерный отчет, Том 67, стр. 265, 1913.

16Сабина и Ватсон. Там же.

17La Nature (Париж), 24 апреля 1909г.

18Рэлей “Теория звука”, том II, § 283.

19Рэлей, там же, 283.

Примечания переписчика

Пунктуация, переносы и написание английских слов были приведены в соответствие, когда в оригинальной книге было обнаружено преобладающее предпочтение; в остальном они не изменялись. Написание неанглийских слов не было изменено.

Были исправлены простые типографские ошибки; несбалансированные кавычки были исправлены, когда изменение было очевидным, и в противном случае оставлены несбалансированными.

Иллюстрации в этой электронной книге размещены между абзацами и вне цитат. В версиях этой книги, поддерживающих гиперссылки, ссылки на страницы в Списке иллюстраций ведут на соответствующие иллюстрации.

Сноски последовательно пронумерованы и помещены вместе в конце книги.